

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»**

**«Методы идентификации динамических параметров каналов связи  
измерительных систем»**

**Методические указания к курсовому проектированию**

для студентов специальности  
7.051001 «Метрология и информационно-измерительные  
технологии»

Утверждено  
редакционно-издательским  
советом университета,  
протокол № 2 от 25.06.2015

Харьков  
НТУ «ХПИ»  
2016

Методические указания к курсовому проектированию по курсам «Информационно-измерительные системы» и «Контроль динамических систем» для студентов специальности 7.051001 «Метрология и информационно-измерительные технологии» / сост.: Кондрашов С. И., Мигущенко Р. П., Григоренко И. В. и др. – Х. : НТУ «ХПИ», 2016. – 64 с.

Составители: С.И. Кондрашов  
Р. П. Мигущенко  
И.В. Григоренко  
Е.А. Борисенко  
М.В. Трохин  
И.М. Коржов

Рецензент        проф. Щапов П.Ф.

Кафедра информационно-измерительных технологии и систем

## ВСТУПЛЕНИЕ

Измерительные системы (ИС) – совокупность функционально объединенных и соединенных между собой каналами связи средств измерений, средств вычислительной техники и вспомогательных устройств, предназначенными для выработки сигналов измерительной информации о физических величинах, свойственных данному объекту, в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в автоматических системах управления. Примерами могут служить системы, развернутые на крупных предприятиях и предназначенные для контроля технологического процесса производства какого-либо изделия.

В зависимости от назначения ИС разделяют на измерительные, контролирующие, управляющие. По числу измерительных каналов системы подразделяют на одно-, двух-, трех- и многоканальные.

Важной их разновидностью являются информационно-измерительные системы. Под информационно-измерительными системами (ИИС) понимаются системы, предназначенные для автоматического получения количественной информации непосредственно от изучаемого объекта путем процедур измерения и контроля, обработки этой информации и выдачи ее в виде совокупности именованных чисел, высказываний, графиков и т.д., отражающих состояние данного объекта. ИИС должны воспринимать изучаемые величины непосредственно от объекта, а на их выходе должна представляться количественная информация об исследуемом объекте.

В ИИС объединяются технические средства, начиная от первичных измерительных преобразователей и кончая устройствами выдачи информации, а также все программы, необходимые как для управления работой собственно системы, так и позволяющие решать в ИИС измери-

тельные и вычислительные задачи, а также управлять конкретным экспериментом.

Предметом учебной дисциплины «Информационно-измерительные системы», в соответствии с названием, являются ИИС, предназначенные для получения, обработки информации и управления производственными процессами, а также системами автоматизации научных исследований. Научно-методической основой дисциплины являются: общая теория систем, теория измерений, теория информации. Дисциплина «Информационно-измерительные системы» является не только одной из базовых дисциплин для подготовки бакалавров по специальности 6.051001, но она также интегрирует знания, полученные студентами при изучении общенаучных и технических дисциплин.

Цель дисциплины – усвоение студентами знаний о принципах построения основных типов измерительных, контрольных и диагностических систем, их основных структур и алгоритмов функционирования.

Значительное внимание при изучении дисциплины отводится изучению системного подхода к построению ИИС на базе принципов иерархичности и блочно-модульной компоновки. Важным при изучении дисциплины является развитие у студентов навыков использования современной вычислительной микропроцессорной техники, а также информационных технологий (поиск необходимой информации в Интернете, использование современного программного обеспечения микропроцессоров и ЭВМ).

Закрепление теоретических знаний дополняется приобретением студентами практических навыков в расчете параметров линий связи измерительных каналов.

Данные методические указания предназначены для проведения курсового проектирования по данной дисциплине.

Курсовое проектирование выполняется с применением компьютерного моделирования в среде Electronics Workbench. Эта среда имеет обширную библиотеку моделей аналоговых и цифровых электронных компонентов различного назначения, а также позволяет составлять и исследовать принципиальные схемы практически неограниченной сложности.

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В настоящее время для производственного сектора экономики Украины характерно использование значительного парка оборудования, которое находится в состоянии сильного износа, и при этом отсутствуют достаточные материальные ресурсы для модернизации. В этих обстоятельствах актуальной становится задача продления срока эксплуатации и предупреждение метрологического отказа оборудования.

Проблема реализации методов тестового контроля измерительных преобразователей (ИП) в распределенных измерительных системах усложняется их удаленностью на 1 – 2 км от места обработки информации, влиянием процессов изменения параметров линии связи (ЛС) и необходимостью временной синхронизации тестовых процедур. Для синхронизации необходима прокладка дополнительных управляющих ЛС, которая на практике невозможна.

Главная особенность динамического тестового контроля в том, что процессы описываются в пространстве двух параметров – амплитуды и времени. Это определяет необходимость решения задачи временной синхронизации системы тестового контроля. Измерение и контроль значения ёмкости линии путем размыкания линии связи со стороны входа (со стороны выхода) позволяет одновременно решить задачу синхронизации, так как приводит к одновременному выходу нормирующего усилителя в режим насыщения за счет отключения сигнала отрицательной обратной связи.

Поскольку в процессе эксплуатации комплексные параметры линии связи меняются вследствие действия внешних факторов, то, зная длительность переходного процесса в линии связи, можно определить момент проведения тестового контроля и, базируясь на результате теста, ввести коррекцию в результат измерения, повышая тем самым их точность.

Моделированию тестовых воздействий и анализу длительности переходных процессов в линиях связи посвящена данная курсовая работа.

## **2. ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ И ПАРАМЕТРЫ ЛИНИЙ СВЯЗИ**

Физическая среда передачи данных может представлять собой кабель (набор проводов, изолированных и защищённых оболочкой). Кабель имеет физические разрывы.

Кроме кабеля, физической средой передачи данных может быть земная атмосфера или космическое пространство, через которые распространяются электромагнитные волны.

В зависимости от среды передачи данных линии связи можно разделить на три группы [1]:

1) проводные (воздушные) линии связи – это провода без изолирующих и экранирующих оплётков, проложенные между столбами и висящие в воздухе. Они проводят телефонные и телеграфные сигналы. Скоростные свойства и помехозащищённость низкие. При отсутствии других каналов связи по ним передаются и компьютерные данные;

2) радиоканалы земной и спутниковой связи – образуются с помощью передатчика и приёмника радиоволн. Могут использоваться для организации сетей в пределах больших помещений типа ангаров или павильонов, там, где использование обычных линий связи затруднено или нецелесообразно;

3) кабельные – состоят из проводников, заключённых в несколько слоёв изоляции. В компьютерных сетях используют три основных типа кабеля:

- а) витая пара (скрученные пары медных проводников);
- б) коаксиальный кабель;
- в) оптоволоконно.

В информационно-измерительных системах на данный момент используются три основные группы кабелей: коаксиальный, симметричный кабель типа «витая пара» и оптоволоконный. Для первых двух групп в качестве среды распространения сигнала используется медная жила, а в оптическом кабеле – световод (оптоволоконно). Выбор кабеля для конкретной системы зависит от ряда факторов, таких, как частотный

диапазон, уровень защиты от помех, скорость передачи, расстояние, стоимость кабеля и т.д.

Коаксиальный кабель имеет медную жилу, окруженную металлической оплеткой, которая экранирует внешние электромагнитные поля (шумы) и помехи от соседних кабелей (перекрестные помехи). Применяются для передачи сигналов на большие расстояния и подразделяются на два типа – тонкий и толстый.

Витая пара (кабель) может быть экранированной и неэкранированной. Неэкранированная витая пара (UTP) делится на семь категорий, из которых пятая наиболее широко применяемая в компьютерных сетях. Экранированная витая пара (STP) позволяет осуществлять передачу сигналов на более высоких скоростях и на большие расстояния, нежели UTP.

Оптоволоконный кабель по сравнению с медными проводами обеспечивает более высокую скорость передачи данных. На него не оказывают влияние внешние помехи, однако он дороже и требует установки дополнительной аппаратуры для приёма/передачи.

Существует две технологии передачи данных: широкополосная и узкополосная. При широкополосной передаче с помощью аналоговых сигналов в одном кабеле одновременно организуется несколько каналов. При узкополосной передаче канал всего один, и по нему передаются цифровые сигналы.

## **2.1. Коаксиальный кабель**

Самый простой коаксиальный кабель состоит из медной жилы (core), окружающей ее изоляции, экрана в виде металлической оплетки и внешней защитной оболочки [1] (рис. 2.1). Если кабель, кроме металлической оплетки, имеет и слой фольги, он называется кабелем с двойным экранированием. При наличии сильных помех используется кабель с учетверенным экранированием. Он состоит из двойного слоя фольги и двойного слоя металлической оплетки.

Электрические сигналы, несущие информацию, передаются по жиле кабеля, которая выполнена в виде одного провода (сплошная) или пучка проводов. Сплошная жила изготавливается, как правило, из меди. Жила окружена изоляционным слоем, который отделяет ее от металлической оплетки. Оплетка – экран (shield) играет роль заземления и защищает жилу от электрических шумов (noise) и перекрестных помех (crosstalk). Перекрестные помехи представляют собой электрические наводки, вызванные токами, протекающими в соседних проводах кабеля.

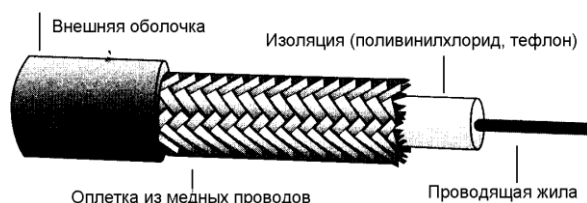


Рисунок 2.1 – Конструкция коаксиального кабеля

Снаружи кабель покрыт непроводящим слоем из резины, тефлона (фторопласта) или пластика. Коаксиальный кабель более помехоустойчив, затухание сигнала в нем меньше, чем в витой паре.

Существует два типа коаксиальных кабелей: тонкий и толстый коаксиальный кабель. Выбор того или иного типа кабеля зависит от потребностей конкретной системы.

Тонкий (thin) коаксиальный кабель – гибкий кабель с диаметром оплетки около 5 мм. Может подключаться непосредственно к платам сетевого адаптера компьютеров. Тонкий коаксиальный кабель используется для передачи информации на расстояние до 185 м.

Толстый (thick) коаксиальный кабель – относительно жесткий кабель с диаметром оплетки около 10 мм. Иногда его называют «стандартный Ethernet кабель», поскольку он был первым типом кабеля, применяемым в сетях Ethernet.



Чем толще жила у кабеля, тем меньше его сопротивление и тем большее расстояние способен преодолеть сигнал. Следовательно, толстый коаксиальный кабель передает сигналы дальше, чем тонкий, в частности до 500 м. В связи с этим толстый коаксиальный кабель часто используют в качестве основного кабеля (магистральной – backbone), который соединяет несколько небольших систем, построенных на тонком коаксиальном кабеле.

Как правило, чем толще кабель, тем сложнее с ним работать. Тонкий коаксиальный кабель гибок, прост в установке и относительно недорог. Толстый кабель трудно гнуть и, следовательно, его сложнее устанавливать. Это очень существенный недостаток, особенно если необходимо проложить кабель по трубам или желобам. Также толстый коаксиальный кабель дороже, но при этом он передает сигналы на большие расстояния [1].

## 2.2. Витая пара

Самая простая витая пара (twisted pair) – это два перекрученных вокруг друг друга изолированных медных провода. Существует два типа: неэкранированная (unshielded) (UTP) и экранированная (shielded) витая пара (STP) (см. рис. 2.3).

Несколько витых пар часто помещают в одну защитную оболочку. Их количество в таком кабеле может быть разным. Скрутка проводов позволяет улучшить степень симметрии электрических параметров кабеля и тем самым уменьшить электрические помехи, наводимые соседними парами или другими источниками.

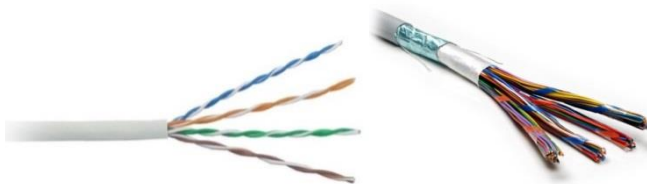


Рисунок 2.2 – Неэкранированная (*unshielded* – UTP) и экранированная (*shielded* – STP) витая пара

Неэкранированная витая пара состоит из двух изолированных медных проводов. Существует несколько спецификаций, которые регулируют количество витков на единицу длины – в зависимости от назначения кабеля.

Кабель типа «неэкранированная витая пара» представляет собой от 1 до 100 пар медных изолированных проводников, скрученных парами с согласованными шагами для уменьшения взаимного влияния. Наиболее распространены двух- и четырёхпарные конструкции кабеля.

Промышленность выпускает ряд типов кабелей витая пара, которые подразделяются на семь категорий.

Одной из главных проблем для всех типов кабелей являются перекрестные помехи – электрические наводки, вызванные сигналами в смежных проводах. Неэкранированная витая пара (спецификация 10BaseT) используется для передачи информации на расстояния до 100 м. Неэкранированная витая пара особенно чувствительна к перекрестным помехам, для уменьшения их влияния используют экран.

Кабель экранированной витой пары (STP) имеет медную оплетку, которая обеспечивает большую защиту от внешних электромагнитных полей, чем неэкранированная витая пара. Кроме того, пары проводов STP обмотаны фольгой. В результате передаваемые данные надежно защищены от внешних помех и могут передаваться с более высокой скоростью и на большие расстояния. Экран выполняется в виде алюминиевой фольги либо медной оплетки, либо и того и другого вместе. Встречается как общее экранирование, так и экраны по скрученным парам. Экраны сопровождаются дренажным проводником в виде медной проволоки для поддержания целостности экрана [1].

### **2.3. Электрические характеристики кабелей связи**

Рассматривая электромагнитные процессы, происходящие в электрических линиях, при помощи которых информация передается на расстояние, необходимо иметь в виду, что магнитные и электрические поля распределены по всей длине линии и превращение электромагнитной

энергии в тепло также происходит по всей длине линии. Таким образом, линия является цепью с распределенными параметрами. Элементарный участок линии с распределенными параметрами показан на рис. 2.4

Электрические свойства проводных линий характеризуются их основными, или первичными параметрами, отнесенными к одному километру длины. Первичными параметрами цепи ЛС являются:

- активное сопротивление  $R$ , [Ом/км];
- индуктивность  $L$ , [Гн/км];
- емкость между проводниками  $C$ , [Ф/км];
- проводимость изоляции между проводами  $G$ , [См/км].

На первичные параметры проводов влияет множество факторов, таких, как влажность, температура окружающей среды, цельность кабеля и т.д. Первичные параметры линии зависят от её конструкции и частоты протекающего в ней тока.

Выборочная проверка [2] кабелей городской телефонной сети, находящихся в эксплуатации 25 – 30 лет, показала, что примерно 60 – 70 % кабелей абонентской распределительной сети не соответствует отраслевому стандарту ОСТ 45.36-97. При этом наблюдается снижение сопротивления изоляции 1 км жил в отдельных случаях до 200 – 300 кОм, увеличение рабочей емкости в два-три раза, рост асимметрии рабочих цепей до 2 %, повышение рабочего затухания на 10 – 15 % и уменьшение переходного затухания между цепями на 5 – 10 дБ.

Основные причины временных изменений параметров существующих кабелей – повышение сопротивлений сростков жил кабелей в местах стыка строительных длин и ухудшение диэлектрических свойств изоляции. Как показали результаты отечественных наблюдений, для кабелей типа ТПП суммарное воздействие указанных факторов приводит к увеличению затухания в среднем на 15 – 20 % за 15 – 20 лет.

Естественные процессы старения полиэтиленовой изоляции также ослабляют диэлектрическую прочность жил, что особенно критично при их использовании для подачи дистанционного питания.

Сопротивление изоляции измеряется при постоянном токе между данной жилой и другими жилами кабеля, а также между жилой кабеля и

его оболочкой. В новом кабеле оно может достигать нескольких тысяч мегом. По мере старения изоляции жил кабеля и воздействия внешних условий (из которых самым опасным является проникновение воды) сопротивление изоляции падает. Как показывает зарубежный опыт, большинство кабелей при нормальных условиях эксплуатации сохраняет этот показатель на уровне нескольких сотен мегом в течение всего гарантированного срока службы. Только в очень старых кабелях с бумажной изоляцией сопротивление изоляции к концу срока службы при нормальных условиях эксплуатации падает до значений порядка десятков мегом. Зарубежный опыт массового внедрения оборудования xDSL свидетельствует, что его нормальная работа обеспечивается при значениях сопротивления изоляции не менее 3,5 МОм.

К типичным повреждениям [2] абонентских линий местных сетей, к которым особенно чувствительна даже низкоскоростная передача данных, относятся и повышенные значения сопротивления сращков жил на стыках строительных длин, выполненных ручной скруткой. Нормированные значения контактного сопротивления сращков жил в разных странах различны и колеблются от 3 до 20 мОм. Увеличение контактного сопротивления для линий, оборудованных системами передачи, не должно превышать 2,5 мОм.

На отечественных телефонных сетях контактное сопротивление сращков, выполненных ручной скруткой, не нормируется. Как показывают результаты испытаний на действующей сети, контактное сопротивление сращков жил реальных линий связи, выполненных ручной скруткой и эксплуатируемых в течение 10–15 лет, колеблется в пределах 40–900 мОм, причем на линиях с обтеканием жил кабеля постоянным током контактное сопротивление сращков имеет меньшую величину и более стабильно.

В местах скрутки может образоваться тонкая пленка окисла, но она легко разрушается при сравнительно небольшом токе (5–10 мА). Если абонентская линия используется для подключения абонента, то такая пленка не создает проблемы. Однако для маломощных сигналов оборудования, где отсутствует постоянная составляющая, она может представлять непреодолимое препятствие. Тем не менее если линия исполь-

зуется не только для подачи сигнала маломощного цифрового оборудования, но и для аналоговой телефонной линии или дистанционного питания абонентских устройств, то негативный эффект отсутствует. Для устранения влияния пленки окисла в случаях, когда передается исключительно цифровой маломощный сигнал, в линию связи может подаваться постоянный ток (так называемый «ток смачивания»).

Линии связи, у которых первичные параметры остаются неизменными по всей длине, называются однородными. Для передачи сигнала в измерительных каналах используется воздушная двухпроводная линия с медными проводами. В качестве цепи с распределенными параметрами будет рассматриваться однородная двухпроводная линия, то есть такая линия, индуктивность, емкость, активное сопротивление и проводимость которой равномерно распределены вдоль всей длины линии. Электрические параметры моделей некоторых линий связи представлены в таблице 2.1 [3–5].

Таблица 2.1 – Электрические параметры моделей линий связи

Тип линии связи		$R$ , мОм/м	$L$ , мкГн/ м	$C$ , пФ/м	$R_{\text{и}}$ , МОм/ м	$\rho$ , Ом	$f$ , Гц
Витая пара UTP кат. 5		180		52	1000	$100 \pm 1$ 5	$10^{6..8}$
Коаксиальный кабель	RG-6	48,1		$52 \pm 3$		75±3	$10^{6..9}$
	RG-11	19,2		$53 \pm 3$		75±3	
	RG-8	17,6		$82 \pm 3$		50±3	
	RG-8X	15,4		$80 \pm 2$		50±2	
Плоский кабель		27	0,7	58			$10^{2..4}$

Тепловые потери в проводах с учетом поверхностного эффекта близости обуславливают продольное сопротивление цепи. Сопротивление [Ом/м] проводов зависит от их диаметра и материала, а также

наибольшей частоты сигнала в линии. Для воздушной двухпроводной линии с медными проводами можно принять  $R \approx \frac{8,33\sqrt{f}}{a} \cdot 10^{-8}$ , где  $a$  – диаметр провода линии, м;  $f$  – наибольшая частота сигнала в линии, Гц.

Магнитный поток, который сцепляется с контуром тока, определяет индуктивность цепи. Индуктивность [Гн/м] линии определяется в основном расстоянием между проводами и диаметром проводов

$L \approx 0,921 \cdot \lg\left(\frac{d}{a}\right)$ , где  $d$  – расстояние между проводами, м;  $a$  – диаметр провода линии, м.

Емкость между проводниками, а также емкости этих проводов по отношению к земле (или соответственно к корпусу машины, самолёта и тому подобное) и другим соседним проводам определяют емкость цепи. Емкость кабельных линий [Ф/м] зависит от расстояния между проводами и их диаметром, а также от материала диэлектрика между ними. Для воздушной двухпроводной линии с медными проводами можно принять

$C \approx \frac{12,07 \cdot 10^{-12}}{\lg\left(\frac{d}{a}\right)}$ , где  $a$  – диаметр провода линии, м;  $d$  – расстояние

между проводами, м.

Проводимость изоляции воздушных линий зависит от погоды, а кабельных – от типа изоляции. Несовершенство изоляции (проводимость изоляции и диэлектрические потери, возникающие в ней) определяют активную поперечную проводимость цепи. Активная проводимость  $G$  между параллельными проводами, зависящая от метеорологических условий, состояния изоляторов, к которым подведены провода, и других факторов, определяется экспериментально.

При расчетах однородных линий связи по первичным параметрам пользуются эквивалентной схемой для 1 км цепи (см. рис. 2.3).

Выделив элементарный участок линии длиной  $\Delta x$ , находящийся на расстоянии  $x$  от начала, и используя первичные параметры  $R$ ,  $C$ ,  $L$  и  $R_n$ , отнесенные к единице длины линии, возможно приближенно пред-

ставить элементарный участок линии в виде последовательно включенного сопротивления  $R\Delta x$  и индуктивности  $L\Delta x$  и параллельно включенных сопротивления изоляции  $R_{\text{и}}\Delta x$  и ёмкости  $C\Delta x$ . На рис. 2.3 введены следующие обозначения:  $U$  – напряжение на входе участка линии связи  $x$ ;  $\Delta U$  – приращение напряжения на участке  $\Delta x$ ;  $I$  – ток в точке  $x$ ;  $\Delta I$  – приращение тока на участке  $\Delta x$ .

Значение частоты выбирается исходя из времени переходного процесса при коммутации ключа К (см. раздел 4) (в статическом режиме в линии протекают токи порядка нескольких Гц), а также условия неискаженной передачи фронта напряжения переходного процесса, тогда  $t = T = R_{\text{н}} C_{\text{н}}$ .

Обратная величина описывает частоту, на которой работает линия. На частотах порядка нескольких кГц ввиду значительного преобладания активного сопротивления токоведущего проводника над его индуктивным сопротивлением последним можно пренебречь.

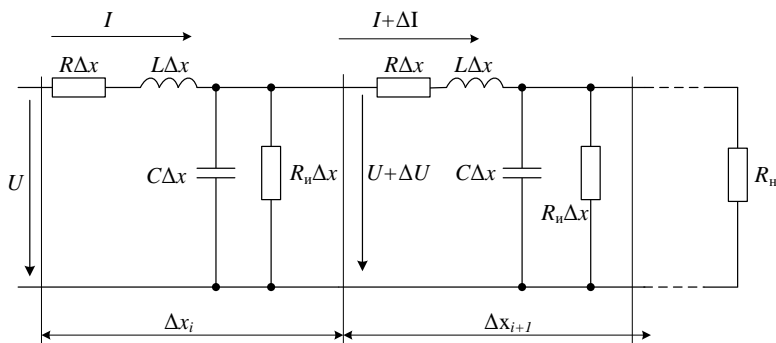


Рисунок 2.3 – Элементарный участок линии с равномерно-распределенными параметрами

После этих выводов распределенные параметры линии связи можно заменить сосредоточенными  $R_{\text{л}}$  и  $C_{\text{л}}$ . Так как коммутация выходной цепи осуществляется вблизи нагрузки, параметры линии связи участву-

ют в переходном процессе как параметры, определяющие инерционность измерительного усилителя [6].

Кроме первичных параметров, проводные линии характеризуются также вторичными параметрами, к которым относятся волновое сопротивление  $\rho$  и коэффициент распространения сигнала  $\gamma$ , составляющими которого являются коэффициент затухания  $\alpha$  и коэффициент фазы  $\beta$  сигнала. Значение волнового сопротивления зависит от первичных параметров линии и частоты тока.

Главное требование, предъявляемое к линиям, – транспортировка сигналов без искажения их формы. Основной причиной искажений импульсов в линии являются потери в проводах и диэлектрике. Существенно, что эти потери возрастают с увеличением частоты колебаний, что приводит к увеличению длительности фронта импульса, распространяющегося в линии. Важно отметить, что рассматриваемые искажения практически линейны, поскольку они не зависят от амплитуды импульса.

Для линии без потерь полагают, что погонные параметры – сопротивление проводов  $R_0$  и проводимость между ними  $G_0$  – равны нулю. Это означает, что в таких линиях электромагнитная волна не затухает, ослабления ее мощности не происходит. Функции, описывающие распределение вдоль линии тока и напряжения, выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned}\frac{du}{dx} &= -L \frac{di}{dt}, \\ \frac{di}{dx} &= -C \frac{du}{dt},\end{aligned}\tag{2.1}$$

где  $x$  – длина линии (координата по длине от источника сигнала к приемнику);  $u$ ,  $i$  – мгновенные значения напряжения и тока соответственно, причем  $u = f(t, x)$ ,  $i = f(t, x)$ .



Выражения (2.1) в специализированной литературе носят название «телеграфных уравнений» [7]. Из (2.1) можно получить волновые уравнения для линий связи без потерь:

$$\begin{aligned}\frac{d^2 u}{dx^2} &= -LC \frac{d^2 u}{dt^2}, \\ \frac{d^2 i}{dx^2} &= -LC \frac{d^2 i}{dt^2}.\end{aligned}\tag{2.2}$$

Обозначив  $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , скорость распространения электромагнитной волны (фазовая скорость) в линии (2.2) можно записать как

$$\begin{aligned}\frac{d^2 u}{dx^2} &= -\frac{1}{v^2} \frac{d^2 u}{dt^2}, \\ \frac{d^2 i}{dx^2} &= -\frac{1}{v^2} \frac{d^2 i}{dt^2}.\end{aligned}$$

Для линии с потерями выражение (2.1) имеет вид

$$\begin{aligned}\frac{du}{dx} &= -L \frac{di}{dt} - R \cdot i, \\ \frac{di}{dx} &= -C \frac{du}{dt} - G \cdot u,\end{aligned}$$

где  $R$  – активное сопротивление проводников,  $G$  – проводимость изоляции, разделяющей проводники. Решение этой системы уравнений в виде комплексных экспонент выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} u(x,t) &= \dot{A}_1 e^{\gamma x + j\omega t} + \dot{A}_1 e^{-\gamma x + j\omega t}, \\ i(x,t) &= \frac{\dot{A}_1 e^{\gamma x + j\omega t} + \dot{A}_1 e^{-\gamma x + j\omega t}}{\rho}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

где  $\dot{A}_1$  и  $\dot{A}_2$  – комплексная амплитуда прямой и обратной (отраженной) волны соответственно;  $\rho$  – волновое (характеристическое) сопротивление линии, модуль которого определяется как

$$\rho = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}, \quad (2.4)$$

где  $G = \frac{1}{R_{\text{и}}}$  – проводимость изоляции;  $\omega = 2\pi f$  – циклическая частота.

Постоянная распространения  $\gamma$  в линии определяется как  $\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta$ , где  $\alpha$  – постоянная затухания в линии, т.е. величина, обратная длине линии, на которой амплитуда волны падает в  $e$  раз, а  $\beta$  – фазовая постоянная, т.е. величина, обратная длине линии, на которой фаза меняется на 1 рад.

Для того чтобы сигнал распространялся по линии без искажений, должны выполняться условия:

- равенство задержек для всех гармоник, т.е. задержка распространения сигнала не должна зависеть от частоты;
- одинаковое затухание для всех гармонических составляющих сигнала.

Проанализировав (2.3) – (2.4), можно сказать, что ток в волне, бегущей в отрицательном направлении, равен взятому с обратным знаком частному от деления напряжения волны, бегущей в том же направлении, на волновое сопротивление.

На конце линии в простейшем случае ставят резистор, называемый «терминатором», имеющий сопротивление  $R_{\text{н}}$ . При наличии неоднород-

ности на конце линии, т.е. при отличии волнового сопротивления линии  $\rho$  от сопротивления нагрузки  $R_n$ , возникнет отраженная волна.

Коэффициент отражения волны напряжения определяется как

$$k_U = \frac{\dot{A}_2}{\dot{A}_1} = \frac{R_n - \rho}{R_n + \rho}, \quad (2.5)$$

а волны тока

$$k_I = -\frac{\dot{A}_2}{\dot{A}_1} = \frac{\rho - R_n}{\rho + R_n}. \quad (2.6)$$

Рассмотрим различные варианты процессов в линии, при разных соотношениях  $R_n$  и  $\rho$ .

При  $R_n = \rho$ ,  $k_I = k_U = 0$ ,  $\dot{A}_2 = 0$  отраженная волна отсутствует, есть только прямая волна, так называемая согласованная нагрузка.

При  $R_n \gg \rho$ ,  $k_I \approx -1$ ,  $k_U \approx 1$ ,  $\dot{A}_2 \approx \dot{A}_1$  амплитуда отраженной волны равна амплитуде падающей; фаза напряжения при отражении сохраняется, а тока обращается на  $180^\circ$ . В линии получается стоячая волна. Вследствие явлений интерференции прямой и многократно отраженных волн форма исходного сигнала существенно искажается.

При  $R_n \ll \rho$ ,  $k_I \approx 1$ ,  $k_U \approx -1$ ,  $\dot{A}_2 \approx -\dot{A}_1$  следствия, аналогичные предыдущему случаю.

Дефекты и повреждения кабеля обычно приводят к изменению его электрических характеристик, что ведет к местному изменению волнового сопротивления. Часть энергии электрического сигнала отражается от места ступенчатого изменения волнового сопротивления. Свойство дефектов отражать электрический сигнал используется при их обнаружении специальными приборами – рефлектометрами (также наз. «кабельными радарами»).

Таким образом, волна напряжения и тока, приходящая к концу линии, отдает нагрузке всю энергию только в том случае, когда волновое сопротивление нагрузки равно волновому сопротивлению линии связи.

В противном случае часть энергии возвращается от конца линии к ее началу в виде отраженной волны тока и напряжения и искажает передаваемые сигналы. Поэтому условием неискаженной (и максимальной мощности) передачи сигналов является равенство волновых сопротивлений нагрузки и линии связи. Согласование волновых сопротивлений различных типов линий обычно производится через согласующий трансформатор.

## **2.4. Переходные процессы в линии связи**

Переходной процесс возникает при скачкообразном изменении уровня сигнала, передаваемого по линии связи. Крайним случаем можно считать разрыв линии – при этом произойдет скачкообразное изменение уровня сигнала до нулевого значения.

Скачкообразные изменения сигнала происходят:

- при передаче цифрового сигнала, переключении между логическими уровнями 0 и 1;
- при коммутации на входе линии связи некоторого количества постоянных по времени, но различных между собой по уровню электрических сигналов.

Рассмотрение переходных процессов для модели, изображенной на рис. 2.4, представляется достаточно сложным в виду различных вариантов его протекания []. Поэтому в дальнейшем будет рассматривать переходные процессы в линии, характеризующейся только емкостью и сопротивлением постоянному току. Воплощением такого случая на практике может служить линия связи токового интерфейса, где сигнал имеет низкочастотный спектр.

### **3. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ**

Основными источниками информации, поступающей в измерительный канал, являются аналоговые измерительные цепи в АСКУ. Они непосредственно связаны с контролируемыми технологическими процессами. Для аналоговых измерительных цепей характерно плавное изменение погрешностей, происходящее как от внутренних причин, так и от изменения внешних условий. Условия их эксплуатации накладывают дополнительные факторы на формирование и изменение во времени погрешностей измерения технологических параметров. Если для цифровых устройств постепенное изменение параметров комплектующих в большинстве случаев приводит к скачкообразному изменению выходных характеристик, что может быть сравнительно легко обнаружено и квалифицировано как внезапный отказ, то в аналоговых средствах таких скачкообразных изменений не наблюдается. Накапливающиеся причины приводят к медленному дрейфу МХ и в определенный момент времени к наступлению скрытого отказа.

Сложность проблемы обнаружения отказа заключается в том, что зафиксировать точное время наступления метрологического отказа невозможно, используя лишь существующие методы периодических проверок измерительных цепей.

Рассмотренные аспекты еще не содержат всех составляющих погрешности измерений технологических параметров, выполняемых с помощью

АСКУ. Использование в АСКУ различных переключающих устройств для выборки необходимой информации в соответствующей измерительной цепи за максимально короткое время связано с переходными процессами в коммутируемых цепях и, следовательно, с возникновением динамических погрешностей. Это обстоятельство приводит к необходимости разработки для АСКУ моделей динамической погрешности как основной погрешности при опросе измерительных цепей. Такая модель

должна содержать также статическую погрешность измерения, причем при увеличении времени измерения соответствующего параметра влияние переходного процесса должно уменьшаться, а при достаточной длительности измерения исключается вовсе. Необходимость разработки такой комплексной модели предусмотрена ГОСТ 8.009-84.

В общем случае для средств измерения в реальных условиях эксплуатации рекомендуется следующий вид модели:

$$\Delta = \Delta_{os} \cdot \overset{\circ}{\Delta}_o \cdot \Delta_{oh} \cdot \sum_{i=1}^k \Delta_{c_i} \cdot \Delta_{dyn},$$

где  $\Delta_{os}$  – систематическая составляющая основной погрешности средства измерения;  $\overset{\circ}{\Delta}_o$  – случайная составляющая основной погрешности средства измерения;  $\overset{\circ}{\Delta}_{oh}$  – случайная составляющая основной погрешности, обусловленная гистерезисом;  $\sum_{i=1}^k \Delta_{c_i}$  – объединение дополнительных погрешностей, средств измерений, обусловленных действием влияющих величин и неинформативных параметров входного сигнала;  $\Delta_{dyn}$  – динамическая погрешность средств измерений, обусловленная влиянием скорости изменения входного сигнала средства измерения;  $k$  – число дополнительных погрешностей.

Эта формула представляет собой символическую запись объединения (обозначенного символом \*) пяти составляющих погрешности средств измерения в реальных условиях применения.

Благодаря большой скорости опроса в АСКУ, образование динамической погрешности происходит не за счет скорости изменения входной величины, а за счет переходных процессов в самом измерительном канале. Не представляется возможным также выделить случайную составляющую погрешности, обусловленную гистерезисом.

При нормировании динамических средств измерений следует разделять по признаку полноты описания свойств на полные и частные.

Полную динамическую характеристику выбирают из числа следующих:

- переходная характеристика  $h(t)$ ;
- импульсная переходная характеристика  $g(t)$ ;
- комплексная передаточная функция  $K(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$ ;
- амплитудно-частотная характеристика  $A(\omega)$ ;
- фазочастотная характеристика  $\varphi(\omega)$ .

Далее используются временные динамические характеристики СИ. Они нормируются лишь для аналоговых СИ.

К частным динамическим характеристикам относят:

- отдельные параметры полных динамических характеристик;
- характеристики, не отражающие полностью динамические свойства средств измерений, но необходимые для выполнения измерений с требуемой точностью или для контроля однородности свойств средств измерений данного типа.

Они нормируются как для аналоговых, так и цифровых СИ, согласно ГОСТ 8.256-77.

При определении полных динамических характеристик предпочтительными являются прямые методы, при которых на вход средств измерений подается испытательный сигнал, позволяющий непосредственно по выходному сигналу определить искомую характеристику. Если невозможно воспроизвести с требуемой точностью испытательный сигнал, позволяющий найти полную динамическую характеристику непосредственно из опытных данных, то допускается ее определение пересчетом другой характеристики, найденной прямым методом. Динамические свойства СИ влияют не только на динамическую составляющую погрешности измерений, но и на статическую погрешность ИС. В любой ИС имеется последовательное соединение нескольких СИ. Последующие в этом соединении СИ преобразуют статические погрешности предыдущих в систематическую погрешность последующих СИ.

В ГОСТ 8.009-84 предусмотрено нормирование таких динамических характеристик СИ, которые позволяют оценивать исключение СИ любых изменяющихся сигналов, поступающих на их вход исследуемых при измерениях, и сигналов, эквивалентных статическим погрешностям СИ предвключенных к данному СИ в ИС. Для линейных СИ такими характеристиками являются передаточная функция, переходная и импульсная характеристики.

Все они относятся к группе полных динамических характеристик, представляющих собой функции, связывающие изменяющийся во времени входной сигнал и вызываемый им выходной сигнал СИ.

Рассмотрим линейное звено, преобразующее входной сигнал  $x(t)$  в выходной  $y(t)$ .

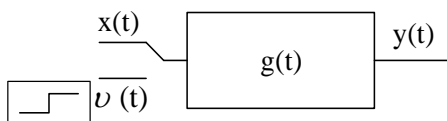


Рисунок 3.1 – Линейное звено

Если в качестве входного сигнала принять единичный сигнал и импульсной функцией данного звена будет иметь вид:

$$v(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t \leq 0 \end{cases}, \quad y(t) = \int_0^t v(\tau) \cdot g(t - \tau) d\tau,$$

а при  $v(t) = 1$ ,  $y(t) = \int_0^t [g(t - \tau)] d\tau = h(t)$ , где  $g(t)$  – импульсная

функция данного звена может быть определена как  $g(t) = \frac{dh(t)}{dt}$ .

Отсюда следует, что для определения переходной функции на вход исследуемого звена необходимо подать единичный скачок входной величины. Для определения импульсной переходной функции  $g(\tau)$  на вход звена необходимо подать дельта-функцию.



## 4. МОДЕЛЬ ИК АСКУ СО СТАТИЧЕСКИМ УРАВНОВЕШИВАНИЕМ

В этом разделе будут рассмотрены измерительные каналы, содержащие измерительные преобразователи, в том числе нормирующие уравнивающего типа, функционирующие по статическому методу преобразования. К таким преобразователям относятся измерительные преобразователи ГСП, а также большое количество преобразователей зарубежных фирм. Структурная схема ИК со статическим уравниванием представлена на рис.4.1 [8].

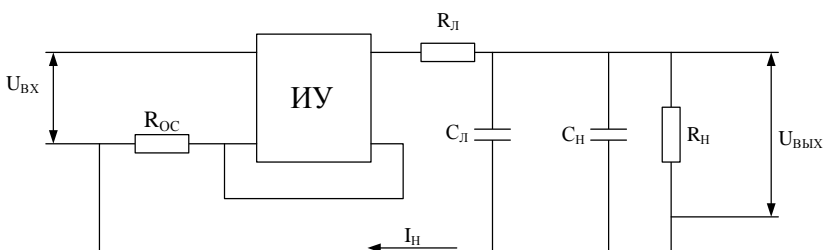


Рисунок 4.1 – ИК со статическим уравниванием

Схема включает: измерительный усилитель с коэффициентом усиления  $K_{ИУ}$ , который преобразует входную величину  $U_{ВХ}$  в выходную  $I_{Н}$ ; линию связи с параметрами  $R_{Л}$  и  $C_{Л}$ ; нагрузку с параметрами  $R_{Н}$  и  $C_{Н}$ , с которой снимается напряжение  $U_{ВЫХ}$ .

### 4.1. Анализ переходной функции ИУ

#### 4.1.1. Переходная функция ИУ без учета параметров линии связи

Рассмотрев схему ИК на рис.4.1, запишем известное выражение передаточной функции ИУ в виде

$$I(p) = \frac{E(p)}{Z(p)},$$

где

$$E(p) = \left[ \frac{U_{\text{вх}}}{p} - I(p) \cdot R_{\text{oc}} \right] \cdot K.$$

В выражение для комплексного сопротивления выходной цепи записывается как

$$Z(p) = R_{\text{oc}} + Z_{\text{н}}(p). \quad (4.1)$$

Очевидно, что приведенное выражение (4.1) справедливо лишь в том случае, когда можно пренебречь параметрами линии связи, т.е. можно считать, что  $R_{\text{л}} \rightarrow 0$  и  $C_{\text{л}} \rightarrow 0$ , или, по крайней мере, выполняются неравенства  $R_{\text{л}} \ll R_{\text{н}}$ ,  $C_{\text{л}} \ll C_{\text{н}}$ . Данное допущение справедливо для достаточно коротких линий связи протяженностью, не превышающей нескольких метров при стандартном соединении кабеля линии связи.

#### **4.2. Переходная функция ИК с учетом распределенных параметров линии связи**

В тех случаях, когда протяженность кабеля линии связи является значительной (сотни – тысячи метров), необходимо учитывать распределенные параметры, соответствующие единице длины линии связи. Учет распределенных параметров линии связи позволяет получить новую переходную функцию по току

$$I(p) = \frac{U_{\text{вх}} \cdot K}{p[Z_0(p) + R_{\text{oc}} \cdot K]}.$$

Это выражение справедливо для схемы ИК на рис 4.1. Комплексное сопротивление выходной цепи, с учетом параметров линии связи, запишется в виде

$$Z_0(p) = \frac{v \cdot l \cdot \varsigma + Z(p)}{1 + \frac{1}{p} \cdot Z_H(p) \cdot v \cdot l},$$

где  $l$  – длина линии связи. Коэффициент  $\varsigma = \frac{R_x}{v}$ ,  $v^2 = p \cdot R_x \cdot C_{\text{л}}$ . Примем, что  $R_{\text{л}} = R_x \cdot l$ ,  $C_{\text{л}} = C_x \cdot l$ . Тогда постоянная времени линии связи равна  $T = R_{\text{л}} C_{\text{л}}$ .

Выходной сигнал является постоянной величиной. Измерительная цепь представлена линией связи, содержащей активное сопротивление  $R_{\text{в}}$  и сосредоточенную получено следующее выражение

$$Z_0(p) = \frac{R_{\text{л}} (R_{\text{л}} + Z_K(p))}{R_{\text{л}} + p \cdot T_{\text{л}} \cdot Z_K(p)}. \quad (4.2)$$

Для случая, когда  $Z(p) = R_{\text{н}}$ , т.е. сопротивление нагрузки шунтируется только емкостью линии, получим

$$Z_0(p) = \frac{R'_{\text{л}} (R'_{\text{л}} + R_{\text{н}})}{R'_{\text{л}} + T_{\text{л}} \cdot R_{\text{л}} \cdot p} = \frac{R'_{\text{л}} + R_{\text{н}}}{T'_1 p + 1}, \quad (4.3)$$

где  $T'_1 = T_{\text{л}} \cdot \frac{R_2}{R'_{\text{л}}} = C_{\text{л}} \cdot R_{\text{л}}$ .

Сделав подстановку выражения (4.3) в ранее записанное выражение (4.2), имеем следующее выражение для тока:

$$I(p) = \frac{U_{\text{вх}} \cdot K(T_1' \cdot p + 1)}{p(R_{\text{л}}' + R_2 + R_{\text{ос}} \cdot K \cdot T_1' p + R_{\text{ос}} \cdot K)} = \frac{I_y (T_1' p + 1)}{p(T_2' p + 1)},$$

где

$$T_2' = \frac{T_2' \cdot R_{\text{ос}} \cdot K}{R_{\text{л}}' + R_2 + R_{\text{ос}} \cdot K}.$$

Значение тока в установившийся момент времени:

$$I_y = \frac{U_{\text{вх}} \cdot K}{R_{\text{л}} + R_{\text{н}} + R_{\text{ос}} \cdot K}.$$

Напряжение на нагрузке будет определяться выражением

$$U_{\text{н}}(p) = \frac{U_{\text{вх}} \cdot K(T_1' p + 1)}{p(T_2' p + 1)}.$$

Более существенный анализ переходной характеристики будет произведен в следующем подразделе.

Таким образом, учет распределенных параметров кабеля линии связи (сопротивления и емкости) приводит к выражениям, полученным ранее из условия сосредоточенных значений сопротивления и емкости кабеля связи.

#### **4.3. Модель ИК и анализ переходного процесса при динамическом тестировании со стороны входа**

Структурная схема для данной модели ИК представлена на рис 2.2.

В схеме используется линейный безынерционный усилитель, то есть он не вносит искажений во входной сигнал и постоянная времени усилителя  $T_K = 0$ . Входной сигнал является постоянной величиной.

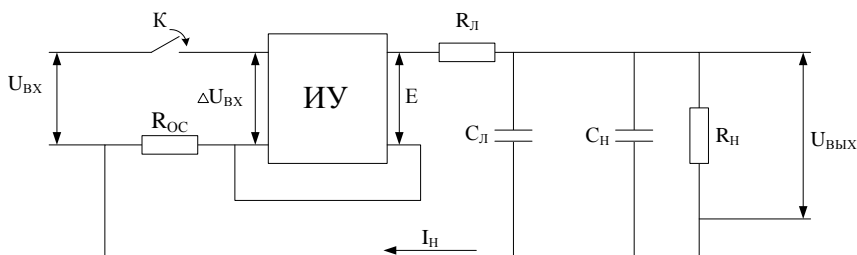


Рисунок 4.2 – Модель ИК при динамическом тестировании со стороны входа

Усилитель в схеме охвачен ОС с активным сопротивлением  $R_{oc}$ . В качестве исполнительного используется входной сигнал. В исходном состоянии ключ находится в замкнутом состоянии. В выходной цепи протекает установившийся ток:

$$I_H = \frac{U_{BX} \cdot K}{R_H + R_L + R_{oc} (K+1)} . \quad (4.4)$$

Устанавливается значение напряжения на нагрузке и определяется как произведение тока и сопротивления нагрузки:

$$U_{нуст} = \frac{U_{BX} \cdot K \cdot R_H}{R_H + R_L + R_{oc} \cdot (K+1)} .$$

В момент размыкания ключа К в выходной цепи ИК происходит переходный процесс, начальными условиями для которого являются:  $U \neq 0, I_H \neq 0, U_{c.л} = U_{c.н} = U_c = U_{н.уст}$ .

По закону коммутации, напряжение на емкости до коммутации равно напряжению после коммутации:  $U_C(-0) = U_C(+0)$ .

Используется операторный метод расчета, запишем выражение, описывающее переходный процесс напряжения нагрузки:

$$U_{\text{н}}(p) = \frac{U_c(-0)/p}{R_v + \frac{1}{p \cdot C_{\Sigma}}} \cdot R_v = \frac{U_{\text{уст}} \cdot R_v}{R_v \cdot p \left( 1 + \frac{1}{p \cdot R_v \cdot C_{\Sigma}} \right)} = \frac{U_{\text{уст}}}{p + \frac{1}{R_v \cdot C_{\Sigma}}}.$$

Перейдя от оперативного метода во временную область по таблицам из [4], находим напряжение на нагрузке:

$$U_{\text{н}}(t) = U_{\text{уст}} \cdot e^{\frac{-t}{T}}.$$

Постоянная времени переходного процесса определяется из выражения

$$T = R_v \cdot C_{\Sigma}, \quad (4.5)$$

где  $R_v$  - эквивалентное сопротивление, определяется как

$$R_v = \frac{R_{\text{н}} (R_{\text{л}} + R_{\text{ос}} \cdot K)}{R_{\text{н}} + R_{\text{л}} + R_{\text{ос}} \cdot K}. \quad (4.6)$$

График переходного процесса напряжения на нагрузке показан на рис. 4.3.

На рисунке  $t_{\text{выкл}}$  - время, за которое переходный процесс полностью заканчивается (обычно оно принимается равным  $10T$ ).

По окончании переходного процесса в схеме ИК справедливы следующие условия  $\Delta U_{\text{вх}} = 0$ ,  $I_{\text{н}} = 0$ ,  $U_{\text{вх}} \neq 0$ . Они принимаются за начальные условия при замыкании ключа  $K$ .

В цепи ИК произойдет переходный процесс, в результате на вход усилителя поступает разность сигналов  $\Delta U_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} - I_{\text{н}} \cdot R_{\text{ос}} = U_{\text{вх}} - U_{\text{ос}}$ , то есть разность между входной величиной и частью выходной.

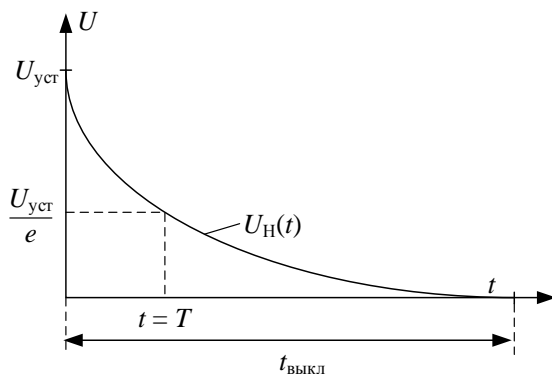


Рисунок 4.3 – Зависимость напряжения на нагрузке от времени

Коэффициент преобразования усилителя можно записать как

$$K = \frac{E}{\Delta U_{вх}} .$$

Перейдя к операторному методу расчета, запишем выражение для разностного напряжения:

$$\Delta U_{вх}(p) = \frac{U_{вх}}{p} - I_H(p) \cdot R_{ос} .$$

Комплексное сопротивление нагрузки определяется

$$Z_H(p) = \frac{R_H \cdot \frac{1}{p \cdot C_H}}{R_H + \frac{1}{p \cdot C_H}} = \frac{R_H}{1 + p \cdot K_H \cdot C_H} . \quad (4.7)$$

Напряжение на выходе усилителя равно

$$E(p) = K \cdot \Delta U_{\text{вх}}(p) = K \cdot \left[ \frac{U_{\text{вх}}}{p} - I_{\text{н}}(p) \cdot R_{\text{ос}} \right].$$

А также справедливо следующее:

$$E(p) = I_{\text{н}}(p) \cdot [Z_{\text{н}} + R_{\text{ос}} + R_{\text{л}}].$$

Приравняв оба выражения для  $E(p)$ , получим

$$\frac{K \cdot U_{\text{вх}}}{p} = I_{\text{н}}(p) \cdot [Z_{\text{н}} + R_{\text{ос}} \cdot (K + 1) + R_{\text{л}}] = I_{\text{н}}(p) \cdot [Z_{\text{н}} + R'],$$

где  $R' = R_{\text{ос}}(1 + K) + R_{\text{л}}$ .

После приведенных преобразований получено следующее выражение для тока:

$$I(p) = \frac{K \cdot U_{\text{вх}}}{p \cdot (Z_{\text{н}} + R')}. \quad (4.8)$$

Напряжение на нагрузке определяется как произведение тока и сопротивления нагрузки:

$$U_{\text{н}}(p) = I_{\text{н}}(p) \cdot Z_{\text{н}}(p). \quad (4.9)$$

Подставим в выражение (4.9) соответствующее формулы (4.8) и (4.7) и проведем необходимые преобразования, получим:

$$U_{\text{н}} = \frac{K \cdot U_{\text{вх}} \cdot R_{\text{н}}}{R_{\text{н}} \cdot R'} \cdot \left[ 1 - e^{\frac{-t}{T}} \right]. \quad (4.10)$$



Тогда  $T=R' \cdot b \cdot C_{\Sigma}$  - выражение для постоянной времени переходного процесса при замыкании ключа.

В процессе преобразований произведен переход от изображенного процесса при замыкании ключа

В процессе преобразований произведен переход от изображения к оригиналу по формулам в соответствии с [4].

Выражение для напряжения на нагрузке запишется следующим образом:

$$U_{\text{н}}(t) = K \cdot U_{\text{вх}} \cdot b \cdot [1 - e^{-t/T}].$$

Подставив необходимые коэффициенты, имеем:

$$U_{\text{н}}(t) = \frac{K \cdot U_{\text{вх}} \cdot R_{\text{н}}}{R_{\text{н}} + R_{\text{л}} + R_{\text{ос}}(K+1)} \cdot [1 - e^{-t/T}],$$

где

$$T = \frac{[R_{\text{л}} + R_{\text{ос}}(K+1)] \cdot R_{\text{н}}}{R_{\text{н}} + R_{\text{л}} + R_{\text{ос}}(K+1)} \cdot C_{\Sigma}. \quad (4.11)$$

По окончании переходного процесса в выходной цепи ИК (на нагрузке) установится постоянный ток:

$$I_{\text{н.у.}} = \frac{U_{\text{вх}} \cdot K}{R_{\text{н}} + R_{\text{л}} + R_{\text{ос}}(K+1)}. \quad (4.12)$$

График переходного процесса напряжения на нагрузке показан на рис. 2.4.

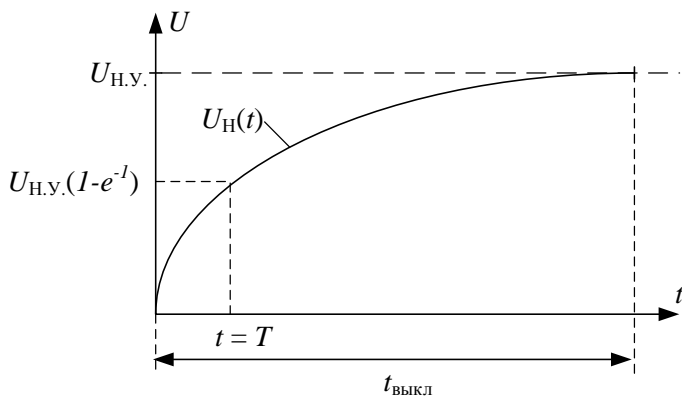


Рисунок 4.4 – Зависимость напряжения на нагрузке от времени

Начальное значение напряжения  $U_H(0) = 0$ , что соответствует емкостному характеру нагрузки. Исходя из полученных выражений для переходных характеристик, можно сделать выводы, что динамическое тестирование возможно как при размыкании, так и при замыкании ключа во входной цепи ИК.

## 5. ИССЛЕДУЕМЫЙ СПОСОБ КОНТРОЛЯ

### 5.1. Описание способа контроля

Структурная схема для данного способа анализа переходного процесса представлена на рис 5.1.

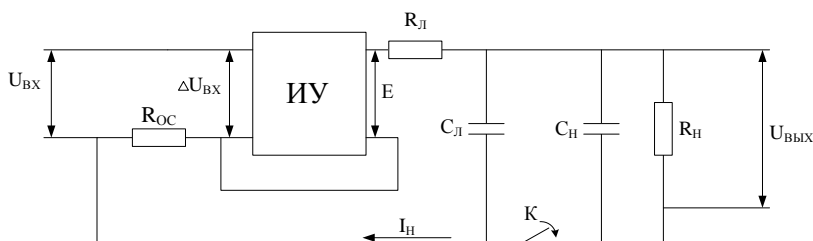


Рисунок 5.1 – ИК с коммутируемой выходной цепью

При данном способе формирования тестового сигнала не требуется применение специальных линий управления элементами коммутации сигналов на выходе аналоговой системы.

Данный способ заключается в измерении амплитуды полезного сигнала, предварительном размыкании цепи сигнала для установления нулевых начальных условий на выходе системы, анализе переходного процесса на сопротивлении нагрузки. Внесены следующие изменения:

- исключены операции коммутации входного сигнала системы;
- введены операции коммутации выходного сигнала системы.

При размыкании ключа линия связи остается подключенной к напряжению  $E$ . Таким образом, после замыкания ключа в цепи происходит переходной процесс, в результате чего на сопротивления нагрузки попадает напряжение  $E$ , что вызывает начальный ток  $I_0$ .

Далее переходный процесс определяется постоянной времени линии связи. Характер переходного процесса в измерительной цепи с до-

статочной длиной линии связи аналогичен переходному процессу с короткой линией связи, содержащей только активное сопротивление и емкость. Учитывая, что усилитель является линейным элементом, напряжение на входе усилителя:

$$E_{\max} = K_{\text{н.у.}} \cdot U_{\text{вх. max}},$$

где  $U_{\text{вх. max}}$  – максимальный входной сигнал;  $K_{\text{н.у.}}$  – статистический коэффициент преобразования усилителя.

## 5.2. Анализ переходного процесса

### 5.2.1. Анализ переходного процесса в цепи ИК с короткой линией связи

Термин «короткая» линия связи далее означает, что в данной линии распределенная емкость и распределенное сопротивление являются малыми, т.е. выполняется условие  $R_{\text{л}} \ll R_{\text{н}}, C_{\text{л}} \ll C_{\text{н}}$  и можно приближенно считать  $R_{\text{л}} \approx 0, C_{\text{л}} \approx 0$ .

Покажем, что тестирование со стороны выходных цепей ИК позволяет в данном случае определять изменение коэффициента измерительного усилителя.

Структурная схема для данного ИК представлена на рис. 5.2

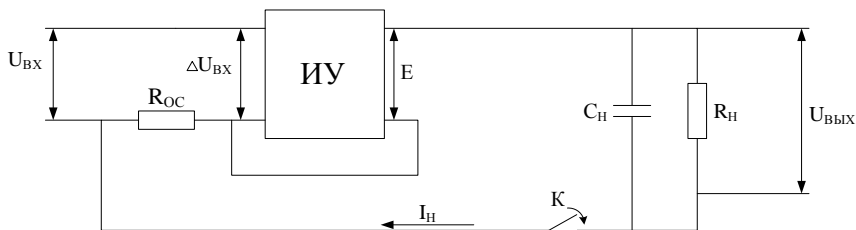


Рисунок 5.2 – Тестирование с короткой линией связи

Предположим, что система линейна, т.е. усилитель не искажает входной сигнал, а также усилитель является безынерционным звеном. Входной сигнал в первом приближении считается постоянным. В исходном состоянии ключ находится в замкнутом состоянии, напряжение с выхода усилителя прикладывается к нагрузке. Установившееся значение напряжения на нагрузке равно

$$E = \frac{U_{\text{вх}} \cdot K \cdot R_{\text{н}}}{R_{\text{н}} + R_{\text{ос}} (K+1)} = U_{\text{н.у.}}$$

При этом емкость нагрузки также заряжена до напряжения  $U_{\text{с}} = U_{\text{н.у.}}$

Рассмотрим случай, когда ключ К в выходной цепи размыкается. Цепь нагрузки отключена от всей схемы, и в ней произойдет переходный процесс, в результате которого емкость нагрузки разрядится на сопротивление нагрузки. Используя операторный метод расчета, составим эквивалентную схему для выходной цепи при разомкнутом ключе (см. рис. 5.3).

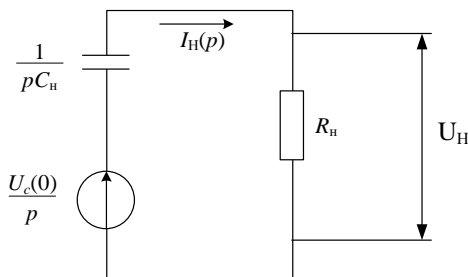


Рисунок 5.3 – Эквивалентная схема выходной цепи

Уравнение, описывающее переходную характеристику в цепи нагрузки, имеет вид:

$$U_H(p) = \frac{\frac{U_C(0)}{p}}{R_H + \frac{1}{p \cdot C_H}} \cdot R_H = \frac{U_{уст} \cdot R_H}{R_H \cdot z \left( p + \frac{1}{C_H \cdot R_H} \right)} = \frac{U_{ну}}{p + \frac{1}{C_H \cdot R_H}} .$$

Перейдем от операторного изображения к оригиналу напряжения на нагрузке:

$$U_H(t) = U_{ну} \cdot e^{-t/T}, \quad (5.1)$$

где  $T = C_H \cdot R_H$  – постоянная времени для данного переходного процесса.

График переходного процесса представлен на рис. 5.4.

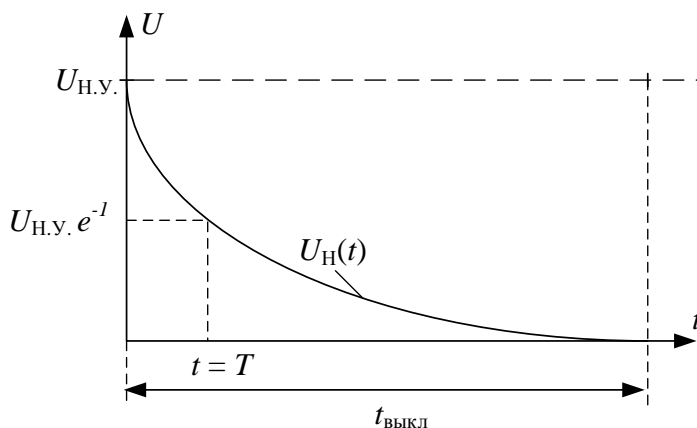


Рисунок 5.4 – Зависимость напряжения на нагрузке от времени

По окончании переходного процесса напряжение на нагрузке будет равно нулю, а на выходе усилителя установится напряжение, равное максимуму:

$$E_{\text{max}} = K \cdot U_{\text{вх}} .$$

При замыкании ключа К на сопротивление нагрузки подается напряжение с выхода усилителя, что вызывает начальный ток

$$I_0 = \frac{E_{\max}}{R_H + R_{oc}}.$$

Ток как входной сигнал в первом приближении считается постоянным  $\frac{U_{BX}}{p}$ , напряжение на емкости  $C_H$  в начальный момент времени равно нулю –  $U_c(0) = 0$ . Значение тока определим из выражения

$$I(p) = \frac{E(p)}{Z(p)},$$

где

$$E(p) = \left[ \frac{U_{BX}}{p} \cdot I_H(p) \cdot R_{oc} \right] \cdot K. \quad (5.2)$$

Комплексное сопротивление выходной цепи:

$$Z(p) = R_{oc} + Z_H(p),$$

где  $Z_H(p) = \frac{R_H}{1 + p \cdot R_H \cdot C_H}$ . Введем обозначение  $R_H \cdot C_H = T_1$ , тогда:

$$Z(p) = R_{oc} \frac{R_H}{1 + p \cdot T_1} = \frac{R_{oc} + p \cdot R_{oc} \cdot T_1 + R_H}{1 + p \cdot R_H \cdot C_H} = \frac{R_{oc} \cdot T_1 \cdot p + R_{\Sigma}}{1 + T_1 \cdot p}, \quad (5.3)$$

где  $R_{\Sigma} = R_H + R_{oc}$ .

С учетом формул (5.2) и (5.3) запишем следующее выражение для тока:

$$I(p) = \frac{T_1 \cdot p + 1}{p(T_2 \cdot p + 1)} \cdot I_y, \quad (5.4)$$

где

$$T_1 = R_H \cdot C_H, \quad (5.5)$$

$$T_2 = \frac{R_H \cdot R_{oc} \cdot (K + 1)}{R_H + R_{oc} \cdot (K + 1)} \cdot C_H, \quad (5.6)$$

а установившееся значение тока

$$I_y = \frac{U_{BX} \cdot K}{R_H + R_{oc} \cdot (K + 1)}.$$

Выражение (5.4) запишем как

$$I(p) = I_y \left[ \frac{1}{p(T_2 \cdot p + 1)} + \frac{T_1 \cdot p}{T_2 \cdot p + 1} \right].$$

Перейдём от операторного метода расчёта во временную область, по формулам из [4]:

$$I(t) = I_y \left[ 1 + \left( \frac{T_1}{T_2} - 1 \right) \cdot e^{-t/T_2} \right],$$

где отношение  $\frac{T_1}{T_2}$  представим в виде

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{C_H \cdot R_H \cdot (R_H + R_{oc} \cdot (K + 1))}{R_H \cdot R_{oc} \cdot (K + 1) \cdot C_H} = 1 + \frac{R_H}{R_{oc} \cdot (K + 1)} = 1 + \xi, \quad (5.7)$$



при этом  $\xi = \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{ос}} \cdot (K + 1)}$ . Из выражения (5.7) следует, что оно всегда больше единицы. В начальный момент времени при  $t = 0$  значение тока составит

$$I_0 = I_y \cdot \frac{T_1}{T_2} = I_y \cdot (1 + \xi).$$

Тогда общее выражение для тока нагрузки можно записать в виде

$$I(t) = I_y \left[ 1 + \xi \cdot e^{-t/T_2} \right].$$

График переходного процесса тока показан на рис. 5.5

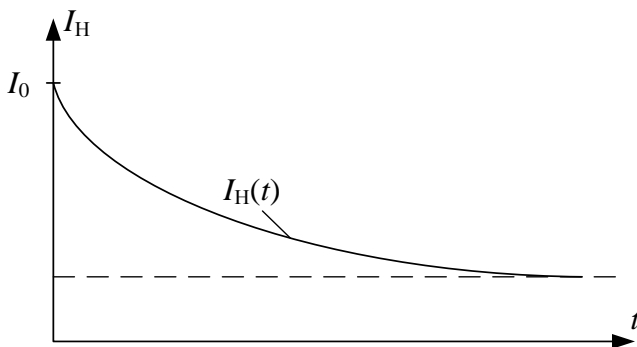


Рисунок 5.5 – Зависимость тока нагрузки от времени

Напряжение на нагрузке будет:

$$U_{\text{н}}(p) = I_{\text{у}} \cdot R_{\text{н}} \frac{T_1 \cdot p + 1}{p \cdot (T_2 \cdot p + 1) \cdot (T_1 \cdot p + 1)} = \frac{U_{\text{н.у.}}}{p \cdot (T_2 \cdot p + 1)}. \quad (5.8)$$

Установившееся значение напряжения на нагрузке:

$$U_{\text{н.у.}} = I_{\text{у}} \cdot R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{вх}} \cdot K \cdot R_{\text{н}}}{R_{\text{н}} + R_{\text{ос}} (K + 1)}.$$

Для выражения (5.8) перейдем от операторного изображения к оригиналу и получим следующее выражение для напряжения на нагрузке:

$$U_{\text{н}}(t) = U_{\text{н.у.}} \left[ 1 - e^{-t/T_2} \right], \quad (5.9)$$

где постоянная времени для данного переходного процесса

$$T_2 = \frac{R_{\text{н}} \cdot R_{\text{ос}} \cdot (K + 1)}{R_{\text{н}} + R_{\text{ос}} \cdot (K + 1)} \cdot C_{\text{н}}. \quad (5.10)$$

Начальное значение напряжения при  $t = 0$  равно нулю, что соответствует емкостному характеру нагрузки.

График переходной функции напряжения на нагрузке от времени показан на рис. 5.6.

Рассмотрим постоянную времени с точки зрения влияния на нее коэффициента усиления ИУ. Запишем выражение (5.6) в виде

$$T_2 = R_{\text{экв}} \cdot C_{\text{н}}, \text{ где } R_{\text{экв}} = \frac{R_{\text{н}} \cdot R_{\text{ос}} (k + 1)}{R_{\text{н}} + R_{\text{ос}} (k + 1)}.$$

Учитывая то, что  $k \gg 1$ , справедливо:

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_{\text{н}} \cdot R_{\text{ос}} k}{R_{\text{н}} + R_{\text{ос}} k} = \frac{R_{\text{н}} + R_{\text{ос}}}{R_{\text{ос}} + R_{\text{н}}/k}. \quad (5.11)$$

Так, как  $\frac{R_H}{k} \approx 0$ , то можно сказать, что значение  $R_{\text{экв}}$  представляет

собой постоянную во времени величину, т.е.  $R_{\text{экв}} = \text{const}$ .

Исходя из полученного значения выражения (5.11) справедливо равенство  $R_{\text{экв}} = R_H$ , тогда выражение для чего запишем в виде  $T_2 = R_H \cdot C_H$ .

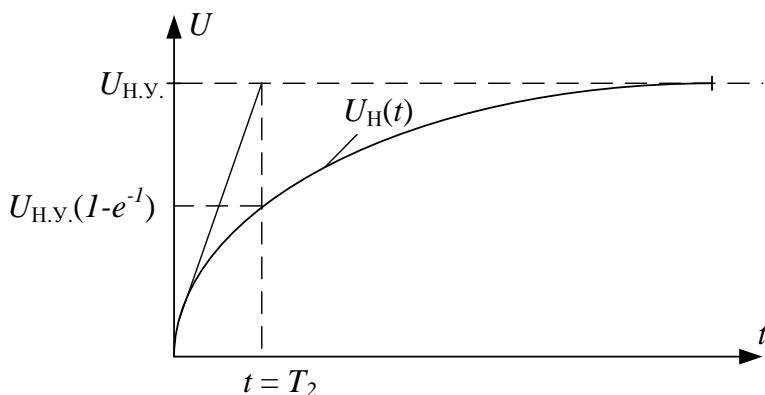


Рисунок 5.6 – Переходная функции напряжения на нагрузке

Можно сделать вывод, что коэффициент усиления не является основным информативным параметром при определении  $T_2$ . Основными параметрами, от которых зависит значение постоянной времени, являются активное сопротивление  $R_H$  и емкость  $C_H$ . Их возможное изменение приведет к изменению  $T_2$ . Идентификация постоянной времени  $T_2$  будет рассмотрена в следующем подразделе.

Исходя из конечных выражений (5.1) и (5.9), функции переходных процессов напряжения на нагрузке имеют одинаковую постоянную времени при коммутации выходного сигнала. Для удобства будем рассматривать динамическое тестирование лишь при замыкании ключа К.

### 5.2.2. Идентификация параметров измерительной цепи

Идентификация параметров измерительной цепи осуществляется при замыкании ключа схемы ИК, представленной на рис.4.2 подраздела 4.2.1.

В данном случае будет идентифицирована постоянная времени  $T_2$ . Рассмотрим нормированную переходную характеристику напряжения на нагрузке  $U_{н.н.}(t) = \frac{U_n(t)}{U_{н.у.}} = 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right)$ . График зависимости данной функции времени представлен на рис.5.7.

Здесь  $U_n(t)$  – переходная характеристика напряжения на нагрузке,  $U_{н.у.}$  – установившееся значение напряжения на нагрузке.

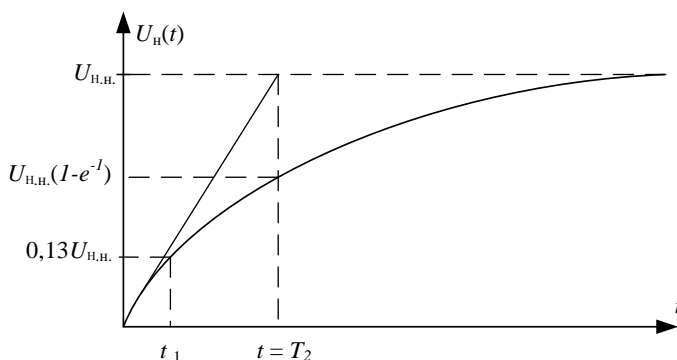


Рисунок 5.7 – Нормированная переходная характеристика напряжения на нагрузке

Определим интервал времени, в пределах которого напряжение на нагрузке можно считать линейным с погрешностью. Для этого использовано разложение экспоненты в ряд  $\exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) = 1 - \frac{t}{T_2} + \frac{t^2}{T_2^2} - \dots$ . Используя первые три члена разложения в ряд, получаем

$U_{н.н}(t) = \frac{t}{T_2^2} - \frac{t^2}{T_2^2}$ . Найдем время  $t_1$ , при котором квадратичный член

достигает заданного значения  $\delta$ ,  $\frac{t_1^2}{T_2^2} \leq \delta$ , откуда  $t \leq T_2 \sqrt{2\delta}$ . При этом

напряжение на нагрузке достигает значения  $U_{н.н}(t_1) = \sqrt{2\delta} - \delta = \Delta U_{н.н}$ .

Приняв значение  $\delta = 0,01$  (1 %), получим  $\Delta[U_{н.н}(t_1)] = 0,13$ .

Рассмотрим следующий алгоритм идентификации постоянной времени  $T_2$ , которая характеризует стабильность параметров измерительной цепи.

В начальный момент идентификации постоянной времени  $T_2$  измеряется и запоминается  $\Delta U_{н.н}$ , т.е. заданная (в соответствии с погрешностью линейности) часть напряжения на нагрузке. После процедуры размыкания и замыкания ключа К измеряется время от момента замыкания ключа до момента совпадения нарастающего напряжения с напряжением  $\Delta U_{н.н}$ , хранящимся в памяти запоминающего устройства, т. е.

$$\Delta U_{н.н} = \frac{t_1}{T_2}, \quad (5.12)$$

при этом пренебрегаем погрешностью  $\delta$ . Из уравнения (5.12) определяем

значение  $T_2 = \frac{t_1}{\Delta U_{н.н}}$ . Сравнивая полученное значение  $T_2$  с хранящимся в памяти первоначальным (эталонным) значением, определяют

необходимость корреляции величины емкости  $C_n$  (при  $R_n = \text{const}$ ) для приведения текущего значения  $T_2$  с эталонным.

График зависимости нормированной переходной характеристики напряжения на нагрузке от изменения параметров постоянной времени приведен на рис. 5.8.

Здесь график переходного процесса с временем  $t_2$  соответствует номинальному значению  $C_{н.н.}$ ,  $R_{н.н.}$ . При изменении значения  $C_n$  в сторону увеличения  $C_i \geq C_{н.н.}$  получена переходная характеристика с временем  $t_3$  и постоянной времени  $T_3$ , а при  $C_i = C_{н.н.}$  соответственно  $t_1$  и  $T_1$ . При этом условии  $R_n$  изменяется, а при  $C_i \leq \text{const}$  будут справедливы приведенные выше соответствия.

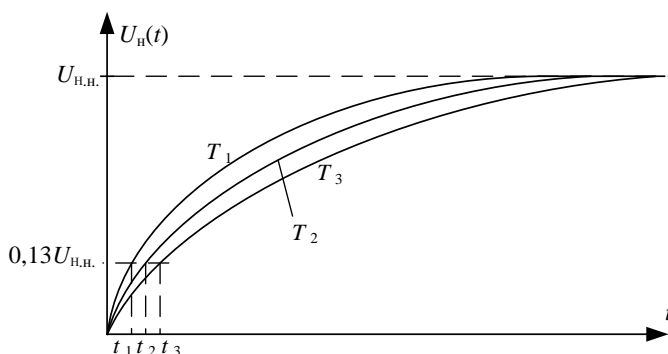


Рисунок 5.8 – Нормированная переходная характеристика напряжения на нагрузке при изменении параметров постоянной времени

### 5.3. Интерфейс «токовая петля». Общие сведения и простейшая реализация

Интерфейс "токовая петля" используется для передачи информации с 1950-х годов. Первоначально в нем использовался ток 60 мА; позже, с 1962 года, получил распространение интерфейс с током 20 мА, преимущественно в телетайпных аппаратах. В 1980-х годах начала широко применяться "токовая петля" 4...20 мА в разнообразном технологическом оборудовании, датчиках и исполнительных устройствах средств автоматики. Популярность "токовой петли" начала падать после появле-

ния стандарта на интерфейс RS-485 (1983 г.), и в настоящее время в новом оборудовании она практически не применяется.

В передатчике "токовой петли" используется не источник напряжения, как в интерфейсе RS-232/485, а источник тока. По определению, ток, вытекающий из источника тока, не зависит от параметров нагрузки. Поэтому в "токовой петле" протекает ток, не зависящий от сопротивления кабеля  $R_{\text{л}}$ , сопротивления нагрузки  $R_{\text{н}}$  и ЭДС индуктивной помехи, а также от напряжения питания источника тока. Ток в петле может измениться только вследствие утечек кабеля, которые очень малы. Это свойство токовой петли является основным и определяет все варианты ее применения. Емкостная наводка, ЭДС которой приложена не последовательно с источником тока, а параллельно ему, не может быть ослаблена в "токовой петле", и для ее подавления следует использовать экранирование.

В качестве линии передачи обычно используется экранированная витая пара, которая совместно с дифференциальным приемником позволяет ослабить индуктивную и синфазную помехи.

На приемном конце ток петли преобразуется в напряжение с помощью калиброванного сопротивления  $R_{\text{н}}$ . При токе 20 мА для получения стандартного напряжения 2,5, 5 или 10 В используют резистор сопротивлением 125 Ом, 250 Ом или 500 Ом соответственно.

Основным недостатком "токовой петли" является ее принципиально низкое быстродействие, которое ограничивается скоростью заряда емкости кабеля  $C_{\text{л}}$  от источника тока. Например, при типовой погонной емкости кабеля 75 пФ/м и длине 1 км емкость кабеля составит 75 нФ. Для заряда такой емкости от источника тока 20 мА до напряжения 5 В необходимо время 19 мкс, что соответствует скорости передачи около 9 кбит/с. На рис. 5.9 приведены зависимости максимальной скорости передачи от длины кабеля при разных уровнях искажений (дрожания), которые оценивались так же, как и для интерфейса RS-485.

Вторым недостатком "токовой петли", ограничивающим ее практическое применение, является отсутствие стандарта на конструктивное исполнение разъемов и электрические параметры, хотя фактически ста-

ли общепринятыми диапазоны токовых сигналов 0..20 мА и 4..20 мА; гораздо реже используют 0..60 мА. В перспективных разработках рекомендуется использовать только диапазон 4..20 мА, как обеспечивающий возможность диагностики обрыва линии и обеспечивающий питание передатчика и передачу сигнала по одной паре проводов.

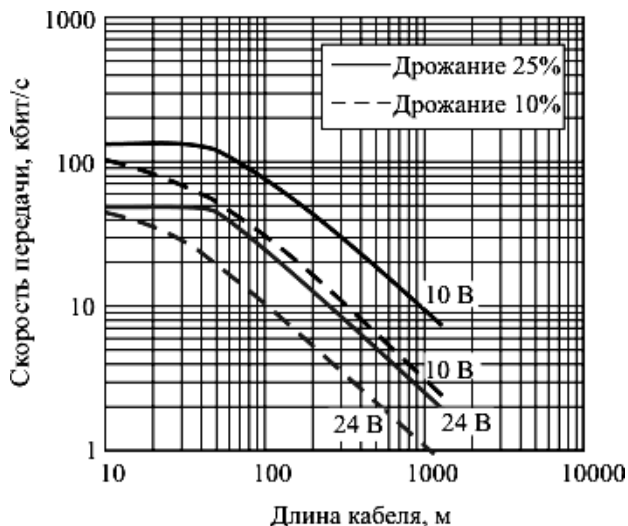


Рисунок 5.9 – Зависимость максимальной скорости передачи "токовой петли" от длины неэкранированной витой пары 22 AWG при токе петли 20 мА [9]

Интерфейс "токовая петля" распространен в двух версиях: цифровой и аналоговой.

Аналоговая версия "токовой петли" используется, как правило, для передачи сигналов от разнообразных датчиков к контроллеру или от контроллера к исполнительным устройствам. Применение "токовой петли" в данном случае дает два преимущества. Во-первых, приведение диапазона изменения измеряемой величины к стандартному диапазону обеспечивает взаимозаменяемость компонентов. Во-вторых, становится возможным передать сигнал на большое расстояние с высокой точностью (погрешность "токовой петли" может быть снижена до  $\pm 0,05\%$ ). Кроме того, стандарт "токовая петля" поддерживается подавляющим



большинством производителей средств промышленной автоматизации. На рисунке 5.10 представлена одна из возможных схемотехнических реализаций токовой петли.

Принцип действия представленной на рис. 5.10 схемы состоит в том, что при бесконечно большом коэффициенте усиления операционного усилителя (ОУ) напряжение между его входами равно нулю и ток через резистор  $R_{oc}$  равен отношению напряжения на входе ОУ к этому сопротивлению  $U_{вх}/R_{oc}$ , а поскольку у идеального ОУ ток входов равен нулю, то ток через резистор строго равен току в петле и, как следует из этой формулы, не зависит от сопротивления нагрузки.

На данном рисунке ОУ включен по неинвертирующей схеме, коэффициент усиления в данном случае определяется как

$$k_y = 1 + \frac{R_5}{R_1} . \quad (5.13)$$

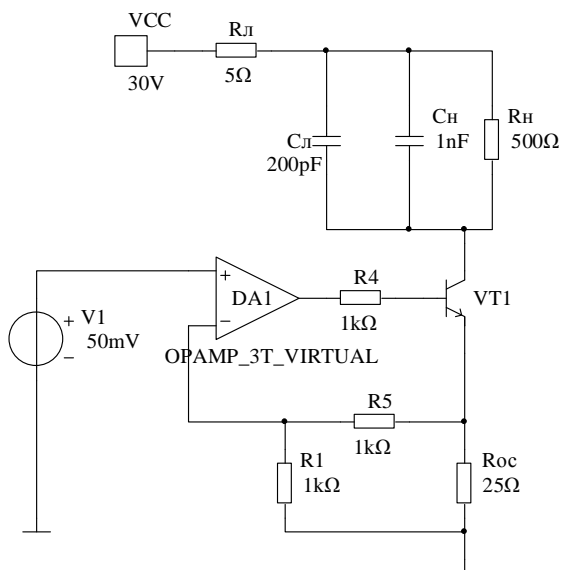


Рисунок 5.10 – Принципиальная схема аналоговой «токовой петли»

Учитывая это и ранее выведенное соотношение (4.4), ток, протекающий через  $R_H$  в установившемся режиме, определяется как

$$I_H = \frac{U_{BX} \cdot K \cdot k_y}{R_L + R_H + R_{oc} \cdot K} . \quad (5.14)$$

Однако при этом предельное значение тока определяется соотношением питающего напряжения  $V_{CC}$  и сопротивления цепи

$$I_H \leq \frac{U_{VCC}}{R_L + R_H + R_{oc}} , \quad (5.15)$$

причем приведенное выражение не учитывает падение напряжения на транзисторе VT1.

Достоинством схемы с операционным усилителем является возможность калибровки передатчика без подключенного к нему кабеля и приемника, поскольку вносимая ими погрешность пренебрежимо мала.

Источником информативного сигнала об измеряемой величине  $x$  может выступать либо напряжение на выходе генераторного датчика, в этом случае  $V1 = f(x)$ , тогда должно выполняться условие  $R_{oc} = \text{const}$ . Второй вариант – применение параметрического датчика – предусматривает  $R_{oc} = f(x)$  и условие  $V1 = \text{const}$ .

## 6. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Таблица 6.1 – Варианты задания для моделирования линии связи

Значения коэффициента отражения	Тип кабеля				
	RG6	RG8	RG8x	RG11	UTP кат. 5
$k_u = (0; -0,1; 0,4; -0,4; 0,9)$	1	2	3	4	5
$k_u = (0; 0,1; 0,5; -0,5; -0,9)$	6	7	8	9	10
$k_i = (0; -0,1; 0,4; -0,4; 0,9)$	11	12	13	14	15
$k_i = (0; 0,1; 0,5; -0,5; -0,9)$	16	17	18	19	20
$k_i = (0; -0,2; 0,2; -0,8; 0,8)$	21	22	23	24	25
$k_u = (0; -0,1; 0,4; -0,4; 0,9)$	26	27	28	29	30

1. Из таблицы 6.1, согласно варианту задания, выбрать кабель, для которого:

а) взять электрические параметры из табл. 2.1, значения недостающих параметров рассчитать, пользуясь формулой (2.4); при расчетах считать, что линия связи работает на нижней границе частотного диапазона; для модели (2.4) построить график зависимости волнового сопротивления от частоты в диапазоне от  $10^1$  до  $10^{12}$  Гц;

б) в ПО Multisim [10] создать модель 10-метровой линии связи ( $n = 10$ ) из указанного кабеля, заменяя идеальную модель с распределенными параметрами моделью рис. 6.1 ( $i = 1..n$ );

в) при сопротивлении генератора  $R_{\text{вн}} = 0$  устанавливать значение  $R_n$  таким образом, чтобы коэффициенты отражения по току и напряжению (выражения (2.5), (2.6)) принимали значения, соответствующие варианту. Подавая на вход линии связи импульсы прямоугольной формы, в ПО Multisim снять осциллограммы напряжения на нагрузке  $R_n$ ; параметры сигнала генератора: частота соответствует нижней границе диапазона частот кабеля, коэффициент заполнения 0,5; длительность фронта и среза по 1 % от длительности периода, амплитуда порядка нескольких вольт;

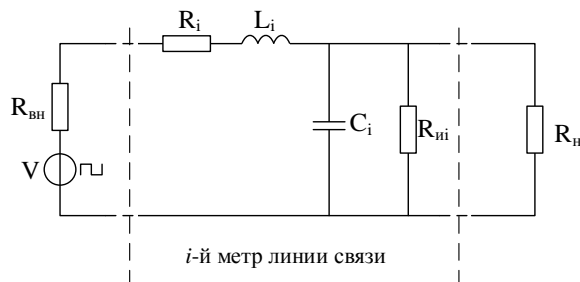


Рисунок 6.1 – Модель линии связи

г) выполнить пункт в) при  $R_{\text{вн}} = R_{\text{н}}$ .

2. Собрать схему «токовой петли» рис. 5.10; в качестве ОУ и транзистора использовать виртуальные компоненты. Емкость нагрузки установить равной  $C_{\text{н}} = 1$  нФ, напряжение питания  $U_{\text{VCC}} = 24$  В. Для этой схемы:

а) распределенные параметры  $R$  и  $C$  линии связи (табл. 2.1) заменить сосредоточенными  $R_{\text{л}\Sigma}$  и  $C_{\text{л}\Sigma}$ , считая  $R_{\text{л}\Sigma} = n \cdot R$  и  $C_{\text{л}\Sigma} = n \cdot C$ ,  $n = 10$ ; индуктивностью линии и проводимостью изоляции пренебречь;

б) определить номиналы  $R_{\text{н}}$ ,  $R_5$ ,  $R_1$ ,  $R_{\text{ос}}$ ,  $U_{\text{V1}}$  для параметрического или генераторного датчика согласно (5.14) и варианта задания таблицы 6.2.

Данный пункт рекомендуется выполнить в такой последовательности:

1) рассчитать  $R_{\text{н}}$ , при котором на предельном токе  $I_{\text{н}}$  напряжение на нагрузке будет  $U_{\text{н}}$ ;

2) для параметрического датчика:

- установив  $k_y = 1$ , по (5.14) рассчитать  $U_{\text{вз}}$ , при котором минимальному значению выходного сигнала (сопротивлению) датчика будет соответствовать максимальное значение тока  $I_{\text{н}}$ ;

- проверить выполнение условия (5.15), при его невыполнении изменяя  $k_y$  (например, в 5–10 раз), добиться выполнения условия (5.15);

3) для генераторного датчика:

- установив  $k_y = 10$ , по (5.14) рассчитать  $R_n$ , при котором максимальному значению выходного сигнала (напряжению) датчика будет соответствовать максимальное значение тока  $I_n$ ;
- проверить выполнение условия (5.15), при его невыполнении изменяя  $k_y$  (например, в 5–10 раз), добиться выполнения условия (5.15);
- в) сохранить скриншот, на котором будет видно, что предельным значениям выходного сигнала первичного преобразователя соответствуют предельные значения тока  $I_n$ .

Таблица 6.2 – варианты задания для моделирования переходного процесса в «токовой петле».

$U_n$ , В	$U_{VI}$ , мВ				$R_{oc}$ , Ом			
	2..10	5..25	100..500	200..1000	5..25	10..50	5..50	30..150
1	1	2	3	4	5	6	7	8
2,5	9	10	11	12	13	14	15	16
3,3	17	18	19	20	21	22	23	24
5	25	26	27	28	29	30	31	32
10	33	34	35	36	37	38	39	40

г) зарегистрировать осциллограммы переходных процессов при тестировании со стороны входа, со стороны выхода и со стороны выхода для «короткой» линии связи. В связи с особенностями пакета Multisim для моделирования рекомендуется схему рис. 5.10 преобразовать к виду, показанному на рис. 6.2. В данной схеме для коммутации со стороны входа и выхода предназначены ключи S2 и S4 соответственно (в библиотеке Multisim 12 это компоненты VOLTAGE\_CONTROLLED\_SPDT). Для периодической коммутации этих ключей в схеме установлены генераторы XFG1 и XFG3. Параметры генераторов: сигнал прямоугольный, амплитуда и смещение равны и составляют порядка нескольких вольт, частота порядка 100 Гц. Ключ S3 предназначен для замыкания накоротко ключа S4, а ключ S2 для отключения ключа S2. Таким образом, для тестирования со стороны входа ключи S1 и S2 необходимо замкнуть. Для тестирования со стороны выхода ключи нужно разомкнуть. Следует

отметить, что тестирование (т.е. коммутация) будет происходить периодически с частотой генераторов XFG1 и XFG3 соответственно. Для работы цепи в режиме без коммутации – ключ S1 нужно разомкнуть, а ключ S3 – замкнуть;

д) по осциллограммам определить постоянную времени переходных процессов, сравнить ее значение с полученным расчетным путем, используя соотношения (4.5)–(4.6);

е) изменить емкость и сопротивление линии поочередно и совместно на значение 20 %; замерить и рассчитать длительность переходного процесса в каждом случае.

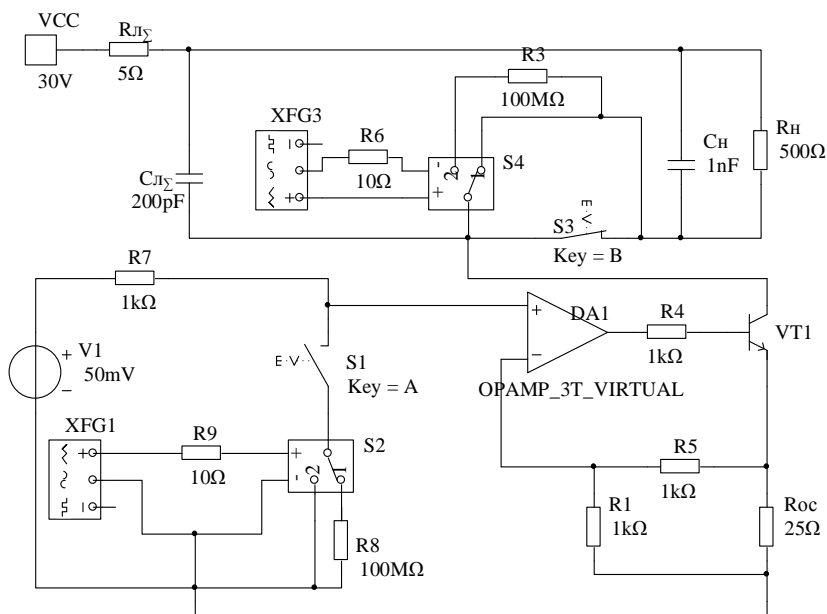


Рисунок 6.2 – Схема для моделирования переходных процессов

## 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ В ПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМЕ АПЕРИОДИЧЕСКОГО ЗВЕНА

Апериодическое звено – типовое звено I порядка, которое описывается выражениями:  $\tau \frac{dy}{dt} + y = kx$ ,  $H(p) = \frac{k}{\tau p + 1}$ , где  $\tau$  – постоянная времени апериодического звена;  $k$  – коэффициент преобразования звена;  $p$  – комплексный параметр,  $p = j\omega$ .

Передаточная функция звена – отношение изображения выходного сигнала к изображению входного, при нулевых начальных условиях, показана на рисунке 7.1. В расчётах выполняет функцию коэффициента усиления:

$$H(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}$$

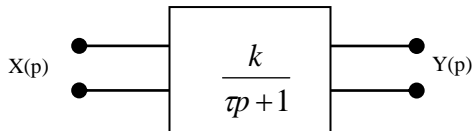
$$Y(p) = H(p)X(p).$$


Рисунок 7.1 – Передаточная функция звена

На линейно нарастающий сигнал накладываем аддитивный тест [10, 11] в виде ступенчатой функции  $1(t)$ , рис. 7.2. Тогда значение входного сигнала:  $U_{\text{вх}}(t) = U_{\text{вх1}}(t) + U_{\text{вх2}}(t)$ , где  $U_{\text{вх1}}(t) = \alpha t$ ,  $U_{\text{вх2}}(t) = 1(t)$ .

Для упрощения расчётов переходим к изображению с помощью преобразования Лапласа:

$$U_{\text{вх1}}(p) = \frac{\alpha}{p^2},$$

$$U_{\text{вх}2}(p) = \frac{1}{p},$$

$$U_{\text{вх}}(p) = \frac{\alpha}{p^2} + \frac{1}{p}.$$

Зададимся условием, что  $k = 1$ , тогда:

$$H(p) = \frac{1}{\tau p + 1},$$

$$U_{\text{вых}}(p) = H(p)[U_{\text{вх}1}(p) + U_{\text{вх}2}(p)] = \frac{1}{\tau p + 1} \left( \frac{\alpha}{\tau p^3 + p^2} + \frac{1}{\tau p^2 + p} \right).$$

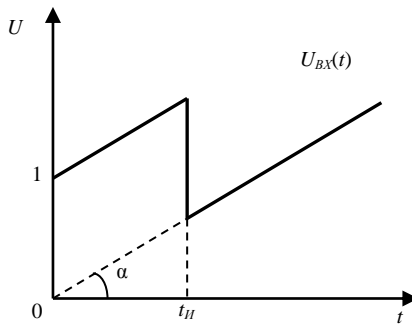


Рисунок 7.2 – Наложение аддитивного теста  $1(t)$  на линейно нарастающий сигнал

С помощью обратного преобразования Лапласа переходим к оригиналу:  $U_{\text{вых}}(t) = \{L^{-1}[U_{\text{вых}}(p)]\} = U_{\text{вых}1}(t) + U_{\text{вых}2}(t).$

За начало отсчёта принимаем начальные условия  $x_0(0) = 0$ , тогда:



$$U_{\text{ВЫХ}1}(t) = \left\{ L^{-1} [U_{\text{ВЫХ}1}(p)] \right\} = \alpha t - \alpha \tau \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

$$U_{\text{ВЫХ}2}(t) = \left\{ L^{-1} [U_{\text{ВЫХ}2}(p)] \right\} = 1 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = \alpha t - \alpha \tau \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + 1 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right).$$

Пусть  $k = 1$  и  $U_{\text{ВХ}} = 1$  при  $t = t_0$ , тогда расчёт динамической погрешности необходимо производить в точках  $t_K$ :

$$t_K = \frac{kT}{v}, \quad (7.1)$$

где  $T$  – интервал контроля;  $t_K$  – дискретное время;  $k$  – коэффициент.

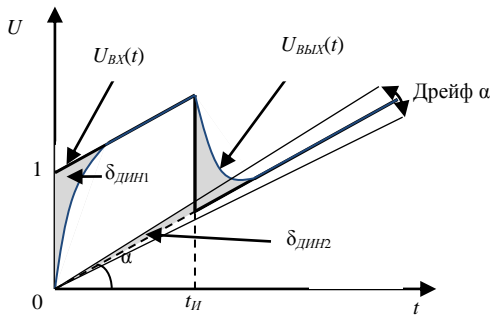


Рисунок 7.3 – Входной и выходной сигналы апериодического звена при аддитивном тесте

Запишем выражение выходного сигнала с учётом принятых условий:

$$U_{\text{вых}}(t_K) = \alpha t_K - \alpha \tau \left( 1 - e^{-\frac{t_K}{\tau}} \right) + 1 \left( 1 - e^{-\frac{t_K}{\tau}} \right). \quad (7.2)$$

Подставив выражение (7.1) для  $t_K$  в (7.2), получим:

$$U_{\text{вых}}(t_K) = \alpha \frac{kT}{v} - \alpha \tau \left( 1 - e^{-\frac{kT}{v\tau}} \right) + 1 \left( 1 - e^{-\frac{kT}{v\tau}} \right).$$

Выполним преобразование:

$$U_{\text{вых}}(t_K) = U_{\text{вых1}} + U_{\text{вых2}} = \alpha T \left[ \frac{k}{v} - \frac{T}{\tau} \left( 1 - e^{-\frac{kT}{v\tau}} \right) \right] + 1 \left( 1 - e^{-\frac{kT}{v\tau}} \right). \quad (7.3)$$

Динамическая погрешность  $\delta_{\text{дин}} = \frac{U_{\text{вых.Н.}}(t) - U_{\text{вых.Р.}}(t)}{U_{\text{вых.Н.}}(t)}$ . При условии  $k = 1$ ,  $U_{\text{вых.Н.}}(t) = k \cdot 1 = 1$ . Тогда:

$$\delta_{\Sigma \text{дин}}(t) = \delta_{\text{дин1}} + \delta_{\text{дин2}} = -e^{-\frac{Tk}{v\tau}} + \alpha T \left( \frac{k}{v} - \frac{T}{\tau} \left( 1 - e^{-\frac{Tk}{v\tau}} \right) \right). \quad (7.4)$$

Таблица 7.1 – Исходные данные

$T/\tau$	$v$	$k$	$\alpha T$	Знак при $\alpha$
5	20	0..20	0,01	+

По формулам (7.3) и (7.4) получены значения выходных напряжений  $U_{\text{вых1}}$ ,  $U_{\text{вых2}}$ ,  $U_{\text{вых}}$ , (см. таблицу 7.2), и значения динамических погрешностей  $\delta_{\text{дин1}}$ ,  $\delta_{\text{дин2}}$ ,  $\delta_{\Sigma \text{дин}}$ , (см. таблицу 7.3). По полученным данным построены графики, (см. рис. 7.4 и рис. 7.5).

Таблица 7.2 – Значения выходного напряжения

$k$	$U_{\text{вых1}}, \text{В}$	$U_{\text{вых2}}, \text{В}$	$U_{\text{вых}}, \text{В}$
0	0	0	0
1	-0,01056	0,221199	0,210639
2	-0,01867	0,393469	0,374796
3	-0,02488	0,527633	0,502752
4	-0,02961	0,632121	0,602515
5	-0,03317	0,713495	0,68032
6	-0,03584	0,77687	0,741026
7	-0,03781	0,826226	0,788415
8	-0,03923	0,864665	0,825431
9	-0,04023	0,894601	0,854371
10	-0,0409	0,917915	0,877019
11	-0,0413	0,936072	0,894769
12	-0,04151	0,950213	0,908702
13	-0,04156	0,961226	0,919665
14	-0,04149	0,969803	0,928312
15	-0,04132	0,976482	0,935158
16	-0,04108	0,981684	0,9406
17	-0,04079	0,985736	0,944949
18	-0,04044	0,988891	0,948446
19	-0,04007	0,991348	0,951281
20	-0,03966	0,993262	0,953599

Таблица 7.3 – Значения выходного напряжения

$k$	$\delta_{\text{дин1}}$	$\delta_{\text{дин2}}$	$\delta_{\Sigma \text{дин}}$
1	2	3	4
0	-1	0	-1
1	-0,7788	-0,01056	-0,78936
2	-0,60653	-0,01867	-0,6252

Окончание таблицы 7.3.

1	2	3	4
3	−0,47237	−0,02488	−0,49725
4	−0,36788	−0,02961	−0,39749
5	−0,2865	−0,03317	−0,31968
6	−0,22313	−0,03584	−0,25897
7	−0,17377	−0,03781	−0,21159
8	−0,13534	−0,03923	−0,17457
9	−0,1054	−0,04023	−0,14563
10	−0,08208	−0,0409	−0,12298
11	−0,06393	−0,0413	−0,10523
12	−0,04979	−0,04151	−0,0913
13	−0,03877	−0,04156	−0,08034
14	−0,0302	−0,04149	−0,07169
15	−0,02352	−0,04132	−0,06484
16	−0,01832	−0,04108	−0,0594
17	−0,01426	−0,04079	−0,05505
18	−0,01111	−0,04044	−0,05155
19	−0,00865	−0,04007	−0,04872
20	−0,00674	−0,03966	−0,0464

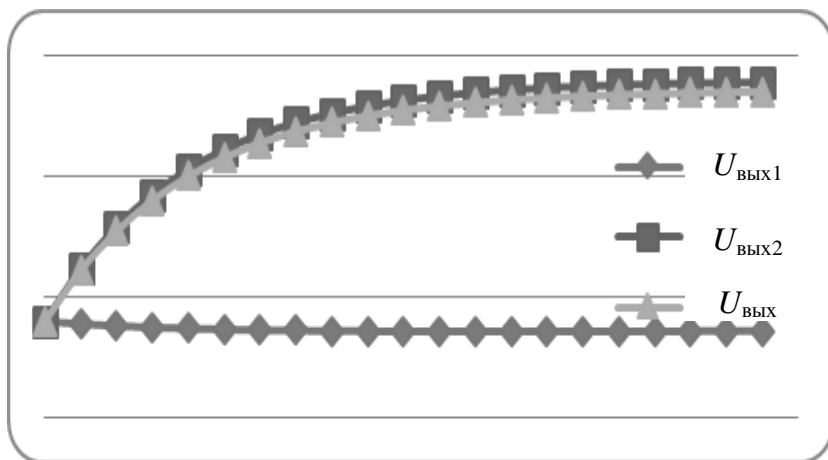


Рисунок 7.3 – График значений напряжений  $U_{\text{вых1}}$ ,  $U_{\text{вых2}}$ ,  $U_{\text{вых}}$ .

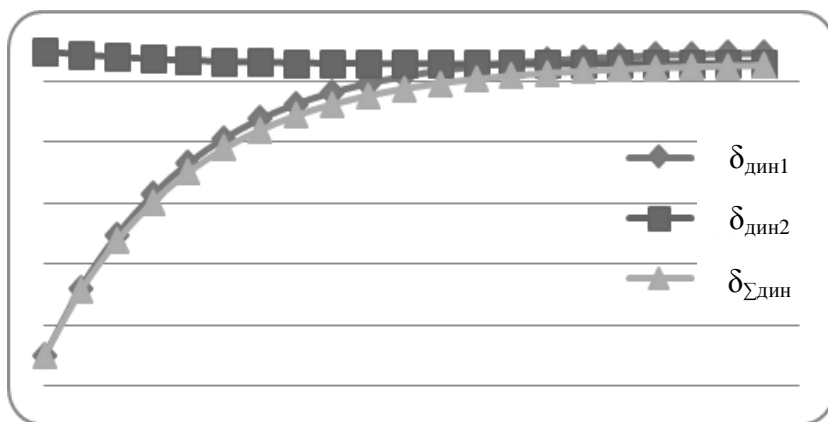


Рисунок 7.4 – График значений динамических погрешностей  $\delta_{\text{дин1}}$ ,  $\delta_{\text{дин2}}$ ,  $\delta_{\text{сдин}}$

Варианты задания для определения динамической погрешности в переходном режиме апериодического звена представлены в таблице 7.4

Таблица 7.4 – Варианты задания для определение динамической погрешности

№ варианта	$T/\tau$	$\nu$	$k$	$\alpha T$	Знак при $\alpha$
1	3	10	0..10	0,03	+
2	3	10	0..10	0,03	–
3	3	10	0..10	0,06	+
4	3	10	0..10	0,06	–
5	3	10	0..10	0,04	+
6	4	15	0..15	0,04	–
7	4	15	0..15	0,01	+
8	4	15	0..15	0,01	–
9	4	15	0..15	0,05	+
10	4	15	0..15	0,05	–
11	5	20	0..20	0,02	+
12	5	20	0..20	0,02	–
13	5	20	0..20	0,05	+
14	5	20	0..20	0,03	–
15	5	20	0..20	0,01	+

**Выводы:** на основе расчётов и графиков можно сделать выводы, что на начальном участке тестового контроля при  $t = 0$  динамическая погрешность  $\delta_{\Sigma \text{дин}} = 100 \%$ , поэтому производить измерения необходимо после окончания переходного процесса, то есть при  $t \geq 5\tau$ .

## 8. ТРЕБОВАНИЯ К ЗНАНИЯМ СТУДЕНТОВ И СОДЕРЖАНИЮ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

В результате выполнения работы студенты должны:

- знать физические основы процессов, протекающих в линиях связи измерительных каналов ИИС;
- уметь использовать приборы для снятия параметров переходных процессов в линиях связи, выполнять их проектную компоновку;
- быть ознакомленными с новейшими достижениями в отрасли производства и использования микроэлектронных элементов;
- освоить программу Multisim и ее использование для создания и анализа принципиальных электрических схем различных устройств.

Пояснительная записка к КП должна содержать:

- краткие теоретические сведения, поясняющие суть работы;
- схему 6.1 с номиналами компонентов, соответствующих варианту задания;
- расчетное значение волнового сопротивления линии связи, соответствующей варианту задания; расчетные значения сопротивления нагрузки, обеспечивающие заданные значения коэффициентов отражения тока и напряжения; осциллограммы сигнала на нагрузке при заданных значениях коэффициентов отражения тока и напряжения и внутреннего сопротивления передатчика;
- схему 6.2 с номиналами элементов, соответствующих варианту задания, и скриншотами работающей схемы;
- расчетные и измеренные при моделировании значения постоянной времени переходного процесса при тестировании схемы со стороны выхода и со стороны входа; осциллограммы переходных процессов;
- то же при измененных значениях сопротивления и емкости линии связи;
- таблицы, содержащие значения выходного сигнала и динамической погрешности при тестовом контроле апериодического звена;
- графики, построенные по результатам таблиц;
- выводы.

## Список литературы

1. Исследование конструкции и электрических параметров кабельных линий связи. Методические указания / сост. В.С. Чернега. – Севастополь: изд-во СевНТУ, 2005. – 20 с.
2. Иванцов И. Диагностика кабельных линий. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.osp.ru/lan/2003/12/138371/>
3. Walter Y. Chen. Home Networking Basis: Transmission Environments and Wired/wireless Protocols. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://books.google.com.ua/books?id=LZo9zpf1YM4C&pg=PA25&lpg=PA25&dq=twisted+pair+electric+parameters+characteristics&source=bl&ots=19MbuTn1h8&sig=fmrKNXcuyS98GiGlt60GwWnT8fA&hl=ru&sa=X&ei=M2ZYVfqTN6Gc7gaduoHQDg&ved=0CCQQ6AEwAQ#v=onepage&q=twisted%20pair%20electric%20parameters%20characteristics&f=false>
4. Кабели радиочастотные. Общие технические условия: ГОСТ 11326.0-78. – [Введ. 01.01.1981]. – Офиц. изд. – М. : ИПК: изд-во стандартов, 2003. – 36 с.
5. Кабели, провода, материалы для кабельной индустрии: справочник. 2-е изд. НПК «Эллипс», 2003. – 360 с.
6. Лачин В.И. Электроника /учеб. пособ. / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. – 6-е изд. Ростов н/Д. : Феникс, 2007. – 710 с.
7. Чумаков А. В. Теоретические основы электротехники: базовый конспект лекций. / Чумаков А. В., Илюшин В. С. / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eeo.tsu.tula.ru/files/eeo-ltoe2.pdf>
8. Балев В.Н. Методы и средства контроля погрешностей измерительных каналов автоматизированных систем контроля и управления: дис. на здобуття наукового ступеня кандидата техн. наук: 05.11.15 / В. Н. Балев. – Х. : 1999. – 216 с.
9. Денисенко В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием/ В.В. Денисенко. – М. : Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с.
10. Григоренко І. В. Розвиток тестових методів підвищення точності електричних компенсаційних вимірювальних перетворювачів у



динамічних режимах: дис. на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.11.05 / Григоренко І. В. – Х. : 2010. – 224 с.

11. Кондрашов С. І. Методи підвищення точності систем тестових випробувань електричних вимірювальних перетворювачів у робочих режимах / Кондрашов С. І. – Х. : НТУ «ХПІ», 2004. – 224 с.

12. Кардашев Г.А. Виртуальная электроника. Компьютерное моделирование аналоговых устройств / Г.А. Кардашев. – М. : Горячая линия–Телеком, 2002. – 260 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ .....	5
2. ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ И ПАРАМЕТРЫ ЛИНИЙ СВЯЗИ ....	6
2.1. Коаксиальный кабель .....	7
2.2. Витая пара .....	9
2.3. Электрические характеристики кабелей связи .....	10
2.4. Переходные процессы в линии связи .....	20
3. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ .....	21
4. МОДЕЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА АСКУ СО СТАТИЧЕСКИМ УРАВНОВЕШИВАНИЕМ .....	25
4.1. Анализ переходной функции ИУ .....	26
4.1.1. Переходная функция ИУ без учета параметров линии связи .....	26
4.2 Переходная функция ИК с учетом распределенных параметров линии связи .....	27
4.3. Модель ИК и анализ переходного процесса при динамическом тестировании со стороны входа .....	29
5. ИССЛЕДУЕМЫЙ СПОСОБ КОНТРОЛЯ .....	35
5.1. Описание способа контроля .....	35
5.2. Анализ переходного процесса .....	36
5.2.1. Анализ переходного процесса в цепи ИК с короткой линией связи .....	36
5.2.2. Идентификация параметров измерительной цепи .....	44

5.3.	Интерфейс «токовая петля». Общие сведения и простейшая реализация .....	46
6.	ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ .....	51
7.	ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ В ПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМЕ АПЕРИОДИЧЕСКОГО ЗВЕНА.....	55
8.	ТРЕБОВАНИЯ К ЗНАНИЯМ СТУДЕНТОВ И СОДЕРЖАНИЮ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ .....	63

Навчальне видання

**Методичні вказівки до курсового проектування з курсу**  
**«Інформаційно-вимірювальні системи»**  
для студентів спеціальності 7.051001  
«Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології»

Укладачі: КОНДРАШОВ Сергій Іванович  
МИГУЩЕНКО Руслан Павлович  
ГРИГОРЕНКО Ігор Володимирович  
БОРИСЕНКО Євген Анатолійович  
ТРОХІН Михайло Вікторович  
КОРЖОВ Ігор Михайлович

Відповідальний за випуск С.І. Кондрашов

Редактор О.С. Самініна

План 2015 р., поз. 177

Підп. до друку 28.04.2016 р. Формат 60×84  $\frac{1}{16}$ . Папір офісний.  
Riso-друк. Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 4,5. Наклад 100 прим.  
Зам. № \_\_\_\_\_. Ціна договірна.

---

Видавець: ФОП Панов А.М. <http://vdele.in.ua>

Виготовлювач: ФОП Панов А.М. свідоцтво серії ДК №4847  
від 06.02.2015 р., 61002, м. Харків, вул. Дружин Мироносиць, 10 оф. 6  
тел. +38(057)714-06-74, +38(050)976-32-87  
[copy@vlavke.com.ua](mailto:copy@vlavke.com.ua), <http://vlavke.com.ua>